

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

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



**UNIVERSITE DE BLIDA 1  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE MECANIQUE  
LABORATOIRE DE RECHERCHE STRUCTURES « L.S »**

**Mémoire de fin d'étude**

**Pour l'obtention du diplôme de Master en**

**Fabrication Mécanique et Productique**

**Conception et réalisation d'une machine CNC à 3 axes**

**Présentée par :**

- **ZAMMOUCHI OUALID BENYOUCEF**
- **BOUGAILA ALI**

**Promoteur : Professeur OUALI MOHAMMED**

**Co-Promoteur : Monsieur Bammoune Fayçal**

**Session : Juin 2021**

# REMERCIEMENTS

*Nous remercions Dieu le tout puissant, de nous avoir donné la santé et la volonté pour faire cet humble travail.*

*Nous tenons à remercier notre promoteur le professeur OUALI MOHAMMED pour l'aide et pour les précieux conseils durant l'étude de ce travail.*

*Notre attention se portera aussi plus particulièrement à notre Co-promoteur monsieur Bammoune Fayçal notre guide dans ce travail concernant le côté pratique et pour nous avoir permis l'accès à son atelier.*

*Aux membres du jury qui nous font l'honneur d'examiner notre modeste travail.*

*Et toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce travail et nous avoir soutenus dans les moments difficiles.*

# DEDICACES

*Nous dédions ce modeste travail à :*

*Nos chers parents pour leur soutien durant notre parcours scolaire, à nos frères et sœur ainsi que nos familles.*

*Et à ceux qui partagent nos bonheurs et malheurs nos chers amis et à l'ensemble des étudiants de la promotion 2020/2021.*

*Toutes les personnes de près ou de loin qui n'ont aidé à réaliser ce travail par leurs conseils, encouragements et l'orientation.*

# Table des matières

REMERCIEMENTS .....	I
DEDICACES .....	II
TABLE DES MATIERES .....	III
LISTE DES FIGURES .....	VII
LISTE DES TABLEAUX .....	IX
LISTE DES ABREVIATIONS : .....	X
LISTE DES SYMBOLES.....	XI
RESUME .....	XIII
INTRODUCTION GENERALE :.....	1
CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES MACHINES-OUTILS A COMMANDE NUMERIQUE (MOCN).....	2
- 1.1) INTRODUCTION A LA COMMANDE NUMERIQUE : .....	3
- 1.2) HISTORIQUE : .....	3
- 1.3) DEFINITION D'UNE MOCN : .....	5
- 1.4) IMPACT INDUSTRIEL <sup>1</sup> : .....	5
- 1.5) L'USINAGE CONVENTIONNELLE ET NUMERIQUE : .....	6
- 1.6) DOMAINE D'UTILISATION : .....	7
- 1.7) MODE D'USINAGE ALTERNATIF :.....	9
- 1.7.1) DEFINITION : .....	9
- 1.7.2) LES AVANTAGES : .....	10
- 1.7.3) ORIGINALITE : .....	10
- 1.7.4) LES MODES DE STRATIFICATION : .....	11
- 1.8) LA M.O.C.N : .....	11
- 1.8.1) LA STRUCTURE D'UNE M.O.C.N : .....	11
- 1.8.1.1) <i>La partie opérative</i> : .....	11
- 1.8.1.2) <i>La partie commande</i> : .....	12
- 1.8.1.3) <i>DCN (Direct Numerical Control)</i> : .....	12
- 1.8.2) PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE MOCN : .....	12
- 1.8.2.1) <i>L'entrée des informations</i> : .....	12
- 1.8.2.2) <i>Les fonctions de commande</i> : .....	12
- 1.8.3) ELEMENTS DE LA PARTIE OPERATIVE : .....	13
- 1.8.4) SYSTEME DE COMMANDE : .....	14
- 1.9) LES DIFFERENTS TYPES DE MACHINE CNC A 3 AXES: .....	15
- 1.10) L'APPORT : .....	15
CHAPITRE II: ETUDE ET CALCUL .....	17
INTRODUCTION:.....	18

<b>- 2.1) CAHIER DE CHARGE :</b>	<b>18</b>
<b>- 2.2) ETUDE DES COMPOSANTS NORMALISES :</b>	<b>19</b>
- 2.2.1) SOLUTIONS ET OPTIONS DISPONIBLES :	19
- 2.2.2) SYSTEME DE GUIDAGE :	19
- 2.2.2.1) Arbres et douilles à billes :	19
- 2.2.2.2) Guide linéaire :	20
- 2.2.2.3) Roues de guidage :	21
- 2.2.3) SYSTEME DE TRANSMISSION:	21
- 2.2.3.1) Courroie :	21
- 2.2.3.2) Chaîne et pignon :	22
- 2.2.3.3) Vis à billes :	22
- 2.2.3.4) Vis trapézoïdale et écrou :	23
- 2.2.4) SYSTEME DE MOUVEMENT:	23
- 2.2.4.1) Les moteurs :	23
- 2.2.4.2) Définition de moteur pas à pas :	24
- 2.2.4.3) Moteur à aimant permanent :	24
- 2.2.4.4) Moteur à réluctance variable :	24
- 2.2.4.5) Rotor hybride :	25
- 2.2.4.6) La broche :	25
- 2.2.5) SYSTEME DE FIXATION:	25
- 2.2.5.1) Soudage :	25
- 2.2.5.2) Vis et écrou :	26
- 2.2.5.3) Accouplement semi-élastiques :	26
- 2.2.6) SYSTEME ELECTRIQUE:	27
- 2.2.6.1) Les interrupteurs de fin de course <sup>1</sup> :	27
- 2.2.6.2) Bouton d'urgence :	27
- 2.2.6.3) Pilote de moteur pas à pas :	27
- 2.2.6.4) Alimentation :	27
<b>- 2.3) CALCULS DES ELEMENTS:</b>	<b>28</b>
- 2.3.1) CALCUL DES MASSES:	28
- 2.3.2) CALCUL DU CENTRE DE GRAVITE DE LA MACHINE:	29
- 2.3.3) CALCULS SUR LES VIS TRAPEZOÏDALES:	29
- 2.3.3.1) Calcul de la pression superficielle de contact « $P_s$ » :	30
- 2.3.3.2) Calcul de la vitesse de glissement « $V_{st}$ » :	30
- 2.3.3.3) Le rendement :	32
- 2.3.4) CHOIX DE MOTEUR :	33
- 2.3.4.1) Le Couple :	33
- 2.3.4.2) La puissance :	33
- 2.3.5) CALCULS DES COMPOSANTS SELON L'AXE Z:	33
- 2.3.5.1) Forces, vitesse et pression exercés sur la tige de l'axe Z :	33
- 2.3.5.2) Conclusion:	35
- 2.3.5.3) Le couple :	35
- 2.3.5.4) La puissance :	35
- 2.3.6) CALCULS DE COMPOSANTS SELON L'AXE X :	35
- 2.3.6.1) Forces, vitesse et pression exercés sur la tige de l'axe X :	35
- 2.3.6.2) Conclusion :	36
- 2.3.6.3) Le Couple :	36
- 2.3.6.4) La Puissance :	36
- 2.3.7) CALCULS DES COMPOSANTS SELON L'AXE Y :	37
- 2.3.7.1) Forces, vitesse et pression exercés sur la tige de l'axe Y :	37
- 2.3.7.2) Conclusion:	37

- 2.3.7.3) Le Couple :	38
- 2.3.7.4) La Puissance :	38
- 2.3.8) CALCULS DU SYSTEME DE GUIDE A RAIL LINEAIRE :	38
- 2.3.8.1) Le choix du chariot de rail linéaire :	38
- 2.3.8.2) Calcul de vie de service :	39
- 2.3.9) CALCULS SUR LES ROUEMENTS :	39
- 2.3.9.1) Calculs sur les roulements de l'axe Z :	40
- 2.3.9.2) Calculs sur les roulements de l'axe Y :	40
- 2.3.9.3) Calculs sur les roulements de l'axe X :	40
<b>- 2.4) CALCULS OPERATIONNELS:</b>	<b>41</b>
- 2.4.1) LA TRAJECTOIRE :	41
- 2.4.2) LES OPERATIONS :	41
- 2.4.3) CALCUL DE LA TRAJECTOIRE AVEC LE LOGICIEL:	41
<b>CHAPITRE III: CONCEPTION ET REALISATION</b>	<b>43</b>
<b>- 3.1) COMPOSANT REALISE:</b>	<b>44</b>
- 3.1.1) CHASSIS :	44
- 3.1.2) SUPPORT MOTEUR ET ROUEMENT :	44
- 3.1.3) SUPPORTS D'ECROU TRAPEZOÏDAL :	45
- 3.1.4) SUPPORT DE L'AXE X :	45
- 3.1.5) SUPPORT DU PORTIQUE ET PLAQUE DE MONTAGE DE GLISSIERE :	46
- 3.1.6) SUPPORT DE MOTEUR DE L'AXE Z :	47
- 3.1.7) SUPPORT DE VIS TRAPEZOÏDALE DE L'AXE X :	47
- 3.1.8) PLAQUE DE SUPPORT DE L'AXE Z :	48
- 3.1.9) SUPPORT DE VIS TRAPEZOÏDALE D'AXE Z :	48
- 3.1.10) PLAQUE SUPPORT DE BROCHE :	49
- 3.1.11) LE PORTE OUTIL :	49
- 3.1.12) LA TABLE :	50
<b>- 3.2) CHOIX DE MATERIAUX:</b>	<b>50</b>
<b>- 3.3) LES PROTOTYPES:</b>	<b>50</b>
<b>CHAPIRE IV: PROGRAMMATION</b>	<b>53</b>
<b>- 4.1) INTRODUCTION:</b>	<b>54</b>
<b>- 4.2) DEFINITION :</b>	<b>54</b>
<b>- 4.3) BLOCS G-CODE :</b>	<b>54</b>
<b>- 4.4) PROGRAMME G-CODE :</b>	<b>55</b>
<b>- 4.5) MODAUX ET CODES D'ADRESSE :</b>	<b>55</b>
<b>- 4.6) EXPLICATION DES CODES G ET DES CODES M :</b>	<b>56</b>
- 4.6.1) CODE G :	56
- 4.6.1.1) G0 - Déplacement rapide :	56
- 4.6.1.2) G1 - Déplacement linéaire :	56
- 4.6.1.3) G2, G3 - Arc dans le sens des aiguilles d'une montre, arc dans le sens inverse des aiguilles d'une montre :	57
- 4.6.1.4) G17, G18, G19 - Désignations des avions :	57
- 4.6.2) CODES M :	57
<b>- 4.7) LA COMMANDE NUMERIQUE :</b>	<b>58</b>
- 4.7.1) LE PILOTE DE MOTEUR PAS A PAS :	58

- 4.7.2) LE FONCTIONNEMENT D'UN PILOTE DE MOTEUR PAS A PAS <sup>1</sup> : .....	58
- 4.7.3) LE CHOIX DES PILOTES DE MOTEUR PAS A PAS <sup>1</sup> : .....	58
- 4.7.4) MICRO-PAS : .....	58
- 4.7.5) LOGICIEL DE PILOTAGE : .....	59
- 4.7.6) CABLAGE DES MOTEURS PAS A PAS : .....	59
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>60</b>
<b>1. CONCLUSIONS: .....</b>	<b>61</b>
<b>2. PERSPECTIVES: .....</b>	<b>61</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>62</b>
<b>ANNEXES : .....</b>	<b>64</b>

# Liste des figures

<b>Figure 1. 1</b> : Représentation schématique d'un équipement à commande numérique <sup>[1]</sup> .....	6
<b>Figure 1. 2</b> : Comparaison de temps d'usinage sur une machine conventionnelle et une machine CN.....	6
<b>Figure 1. 3</b> : Productivité comparée de diverses machines en fonction de leur niveau d'automation .....	7
<b>Figure 1. 4</b> : Domaine d'utilisation des machines-outils à commande numérique .....	8
<b>Figure 1. 5</b> : Diagramme de la stratoconception .....	9
<b>Figure 1. 6</b> : Différence entre les méthodes d'usinage.....	11
<b>Figure 1. 7</b> : Structure d'une MOCN.....	11
<b>Figure 1. 8</b> : Sous-ensembles technologiques d'un axe numérique .....	13
<b>Figure 1. 9</b> : Machine CNC de type 1.....	15
<b>Figure 1. 10</b> : Machine CNC de type 2.....	15
<b>Figure 1. 11</b> : Diagramme de fonctionnement de l'écrou anti-jeu .....	16
<b>Figure 2. 1</b> : Arbres et douilles à billes.....	19
<b>Figure 2. 2</b> : Guide linéaire.....	20
<b>Figure 2. 3</b> : Roues de guidage .....	21
<b>Figure 2. 4</b> : Courroie .....	21
<b>Figure 2. 5</b> : Chaîne et pignon .....	22
<b>Figure 2. 6</b> : Vis à billes .....	22
<b>Figure 2. 7</b> : Vis trapézoïdale et écrou.....	23
<b>Figure 2. 8</b> : Diagramme d'un moteur pas à pas .....	24
<b>Figure 2. 9</b> : Diagramme d'un moteur à aimant permanent .....	24
<b>Figure 2. 10</b> : Diagramme d'un moteur à réluctance variable .....	24
<b>Figure 2. 11</b> : Diagramme d'un moteur hybride .....	25
<b>Figure 2. 12</b> : Rendu 3D de la broche .....	25
<b>Figure 2. 13</b> : Emplacement de la broche dans la machine .....	25
<b>Figure 2. 14</b> : Soudage.....	25
<b>Figure 2. 15</b> : Vis et écrou .....	26
<b>Figure 2. 16</b> : Accouplement semi-élastiques .....	26
<b>Figure 2. 17</b> : Interrupteur de fin de course.....	27
<b>Figure 2. 18</b> : Bouton d'urgence.....	27
<b>Figure 2. 19</b> : Carte de commande SH-DM542 .....	27
<b>Figure 2. 20</b> : Alimentation électrique .....	27
<b>Figure 2. 21</b> : Centre de gravité de la machine à l'extrémité avant et arrière .....	29
<b>Figure 2. 22</b> : Condition de Glissement du bronze.....	31
<b>Figure 2. 23</b> : Diagramme d'une vis trapézoïdale .....	32
<b>Figure 2. 24</b> : Axes de la machine .....	33
<b>Figure 2. 25</b> : Diagramme de dureté.....	38
<b>Figure 2. 26</b> : Diagramme de température.....	38
<b>Figure 2. 27</b> : configuration de la machine.....	41
<b>Figure 2. 28</b> : Définitions de l'origine et les dimensions de la pièce brute.....	42
<b>Figure 2. 29</b> : Choix de la face d'usinage et les formes usinables .....	42

<b>Figure 2. 30</b> : La trajectoire de l'outil .....	42
<b>Figure 3. 1</b> : Rendu 3D du châssis.....	44
<b>Figure 3. 2</b> : Emplacement du châssis dans la machine .....	44
<b>Figure 3. 3</b> : le châssis .....	44
<b>Figure 3. 4</b> : Support moteur et roulement .....	44
<b>Figure 3. 5</b> : Emplacement de support dans la machine.....	44
<b>Figure 3. 6</b> : Rendu 3D de Supports d'écrou trapézoïdale .....	45
<b>Figure 3. 7</b> : Emplacement de support d'écrou trapézoïdale .....	45
<b>Figure 3. 8</b> : Support d'écrou trapézoïdal .....	45
<b>Figure 3. 9</b> : Rendu 3D de support de l'axe X .....	45
<b>Figure 3. 10</b> : Emplacement de support de l'axe X.....	45
<b>Figure 3. 11</b> : Support de l'axe X.....	45
<b>Figure 3. 12</b> : Rendu 3D de plaque de montage de glissière .....	46
<b>Figure 3. 13</b> : Support du portique et plaque de montage de glissière .....	46
<b>Figure 3. 14</b> : Rendu 3D de Support du portique .....	46
<b>Figure 3. 15</b> : Rendu 3D de support de moteur de l'axe Z .....	47
<b>Figure 3. 16</b> : Emplacement de support de moteur de l'axe Z.....	47
<b>Figure 3. 17</b> : Support de moteur de l'axe Z.....	47
<b>Figure 3. 18</b> : Rendu 3D de support de vis trapézoïdale de l'axe X .....	47
<b>Figure 3. 19</b> : Emplacement de support de vis trapézoïdale de l'axe X .....	47
<b>Figure 3. 20</b> : Support de vis trapézoïdale de l'axe X.....	47
<b>Figure 3. 21</b> : Rendu 3D de plaque de support de l'axe Z .....	48
<b>Figure 3. 22</b> : Emplacement Plaque de support de l'axe Z.....	48
<b>Figure 3. 23</b> : Plaque de support de l'axe Z.....	48
<b>Figure 3. 24</b> : Rendu 3D de support de vis trapézoïdale d'axe Z.....	48
<b>Figure 3. 25</b> : Emplacement de support de vis trapézoïdale d'axe Z .....	48
<b>Figure 3. 26</b> : Rendu 3D de plaque support de broche.....	49
<b>Figure 3. 27</b> : Emplacement de plaque support de broche .....	49
<b>Figure 3. 28</b> : La plaque support de broche.....	49
<b>Figure 3. 29</b> : Rendu 3D de porte outil.....	49
<b>Figure 3. 30</b> : Emplacement du porte outil.....	49
<b>Figure 3. 31</b> : Rendu 3D de la table ou surface de travail .....	50
<b>Figure 3. 32</b> : Emplacement de la table .....	50
<b>Figure 3. 33</b> : Première prototype de la conception de la machine .....	51
<b>Figure 3. 34</b> : Deuxième prototype de la conception de la machine .....	51
<b>Figure 3. 35</b> : Troisième et dernière prototype de la conception de la machine .....	51
<b>Figure 3. 36</b> : Les composants de la machine .....	52
<b>Figure 4. 1</b> : Représentation de déplacement rapide.....	56
<b>Figure 4. 2</b> : Représentation d'un déplacement dans un arc .....	57
<b>Figure 4. 3</b> : Représentation des coordonnées et leur code G .....	57
<b>Figure 4. 4</b> : Entraînement des bobines dans les deux sens de rotation .....	58
<b>Figure 4. 5</b> : La résolution du signal de chaque type de pas .....	59
<b>Figure 4. 6</b> : Interface d'utilisateur de NcStudio .....	59
<b>Figure 4. 7</b> : Diagramme de câblage des moteurs pas à pas .....	59

# Liste des Tableaux

<b>Tableau 1. 1 :</b> Symboles et définition de figure 8 .....	13
<b>Tableau 1. 2:</b> Avantages et inconvénients de machine type 1 .....	15
<b>Tableau 1. 3:</b> Avantages et inconvénients de machine type 2 .....	15
<b>Tableau 1. 4 :</b> Avantages et inconvénients de l'écrou anti-jeu .....	16
<b>Tableau 2. 1 :</b> Avantages et inconvénients des arbres et douilles à bills .....	20
<b>Tableau 2. 2:</b> Avantages et inconvénients de guide linéaire .....	20
<b>Tableau 2. 3:</b> Avantages et inconvénients de Roues de guidage .....	21
<b>Tableau 2. 4:</b> Avantages et inconvénients de courroie.....	21
<b>Tableau 2. 5:</b> Avantages et inconvénients de chaine et pignon .....	22
<b>Tableau 2. 6:</b> Avantages et inconvénients de vis à billes.....	22
<b>Tableau 2. 7:</b> Avantages et inconvénients de vis trapézoïdale et écrou .....	23
<b>Tableau 2. 8:</b> Différents types de moteurs .....	23
<b>Tableau 2. 9:</b> Avantages et inconvénients de soudage .....	26
<b>Tableau 2. 10:</b> Avantages et inconvénients de vis et écrou.....	26
<b>Tableau 2. 11 :</b> Masses des composants de l'axe Z .....	28
<b>Tableau 2. 12 :</b> Masses des composants de l'axe X.....	28
<b>Tableau 2. 13 :</b> Masses des composants de l'axe Y .....	29
<b>Tableau 2. 14 :</b> Coefficients de sureté pour différents types de charges.....	32
<b>Tableau 2. 15:</b> Coefficients de friction (Fr) pour différents types de charges .....	32
<b>Tableau 2. 16:</b> Condition de charge et facteur de charge Fw .....	39
<b>Tableau 4. 1 :</b> Les codes et leur définition .....	56
<b>Tableau 4. 2 :</b> Liste des codes M et leurs définitions.....	57

# Liste des abréviations :

<b>Abréviation</b>	<b>Définition</b>
<b>CN</b>	Command Numérique
<b>MOCN</b>	Machine-outil à commande numérique
<b>DCN</b>	Contrôle numérique direct (Direct numerical control
<b>CNC</b>	Computerized numerical control
<b>CAO</b>	Conception assistée par ordinateur
<b>CC</b>	Courant continu
<b>AC</b>	Courant alternatif
<b>NEMA</b>	National electrical manufacturers association
<b>FET</b>	Transistor à effet de champ (Field-effect transistor)
<b>PCB</b>	Circuit imprimé
<b>CW</b>	Dans l'aiguille de l'horloge
<b>CCW</b>	Dans le sens antihoraire
<b>CI</b>	Circuit intégré

# Liste des symboles

<b>Symbole</b>	<b>Définition</b>
<b>C</b>	<i>Coût total de fabrication pour une pièce</i>
<b>Cu</b>	<i>Coût d'usinage d'une pièce (matière, main d'œuvre directe, coût machine)</i>
<b>Cr</b>	<i>Coût de lancement de la série et des réglages des outils et de la machine</i>
<b>L</b>	<i>Nombre de pièces d'une série,</i>
<b>Cp</b>	<i>Coût de préparation (gammes et programmes d'usinage) et des outillages</i>
<b>Z</b>	<i>Nombre de séries</i>
<b>ZL</b>	<i>Nombre total de pièces fabriquées</i>
<b>P<sub>s</sub></b>	<i>Pression superficielle</i>
<b>F</b>	<i>Force axiale</i>
<b>A<sub>t</sub></b>	<i>Surface d'appui</i>
<b>V<sub>st</sub></b>	<i>Vitesse de glissement</i>
<b>n</b>	<i>Nombre de tour par minute de la vis</i>
<b>P</b>	<i>Pas de filetage</i>
<b>α</b>	<i>Angle d'inclinaison de l'hélice de filetage</i>
<b>V<sub>tr</sub></b>	<i>Vitesse de transfert</i>
<b>f<sub>i</sub></b>	<i>Coefficients de sureté</i>
<b>R<sub>v</sub></b>	<i>Rapport de vitesse</i>
<b>X<sub>e</sub></b>	<i>Déplacement de l'effort</i>
<b>X<sub>c</sub></b>	<i>Déplacement de la charge</i>
<b>D</b>	<i>Diamètre de la vis trapézoïdale</i>
<b>η</b>	<i>Le rendement</i>
<b>β</b>	L'angle du coefficient de friction
<b>Fr</b>	Coefficient de friction
<b>F<sub>1</sub></b>	Charge axial de poids des composants
<b>F<sub>2</sub></b>	Forces d'inertie due aux accélérations et aux décélérations
<b>F<sub>3</sub></b>	Les efforts de coupes et de pénétration
<b>γ</b>	L'accélération
<b>ΔV</b>	Variation de vitesse linéaire
<b>F<sub>p</sub></b>	L'effort de pénétration
<b>F<sub>c</sub></b>	L'effort de coupe
<b>K<sub>c</sub></b>	Coefficient spécifique de coupe de la matière
<b>a</b>	Profondeur de passe
<b>N</b>	Vitesse de rotation de la broche
<b>C</b>	Le couple
<b>C<sub>z</sub></b>	Le couple dans l'axe Z
<b>C<sub>nz</sub></b>	Le couple dans l'axe Z avec le coefficient de sécurité
<b>P<sub>t</sub></b>	La puissance
<b>C</b>	Charge dynamique
<b>F<sub>h</sub></b>	Facteur de dureté
<b>F<sub>t</sub></b>	Facteur de température
<b>F<sub>w</sub></b>	Facteur de charge

<b><math>P_c</math></b>	Charge appliquée
<b><math>L</math></b>	La durée de vie
<b><math>f_Z</math></b>	Coefficient supplémentaire des efforts dynamiques
<b><math>f_H</math></b>	Coefficient de dureté
<b><math>f_t</math></b>	Coefficient de température
<b><math>f_L</math></b>	Coefficient de durée de vie
<b><math>f_n</math></b>	Coefficient de nombre de tours

# Résumé

Dans ce projet, on s'intéresse au processus de la conception et de la fabrication d'un prototype de fraiseuse CNC à 3 axes. On essaye de réduire ou d'éliminer le jeu qui peut survenir lors de l'utilisation des vis trapézoïdales moins chères avec des tolérances de fabrication plus larges, tout en prenant en compte les calculs pour assurer la fonctionnalité et les coûts du projet.

Le prototype de fraiseuse CNC à 3 axes, après étude, sera réalisé.

# Abstract

In this project we are going to tackle the process of designing and manufacturing a 3 axes CNC mill, while trying to reduce or eliminate the backlash that can occur when using cheaper trapezoidal screws with looser manufacturing tolerances, all while taking into consideration the calculations to ensure functionality and the cost of the project.

The CNC milling prototype 3-axis, after study will be realized.

# مختصر

في هذا المشروع ، سنقوم بمعالجة عملية تصميم وتصنيع آلة CNC ذات 3 محاور ، مع محاولة تقليل أو القضاء على رد الفعل العكسي الذي يمكن أن يحدث عند استخدام براغي شبه منحرفة أرخص مع تفاوتات تصنيع أقل ، كل ذلك مع مراعاة الحسابات لضمان وظائف وتكلفة المشروع.

سيتم إنتاج نموذج أولي لآلة CNC ذات 3 محاور ، بعد الدراسة.

## **INTRODUCTION GENERALE :**

Les machines CNC jouent un rôle important dans plusieurs domaines de l'industrie moderne. Elles sont largement utilisées dans la production grâce à leur précision et haute qualité, ce que nous a encouragés à choisir ce projet.

L'objectif de ce travail est de réaliser un prototype d'une mini fraiseuse à commande numérique constituée de trois axes.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation des généralités sur les technologies des machines-outils à commande numérique M.O.C.N.

Dans le deuxième chapitre, on étudie la faisabilité de projet en définissant les besoins et les fonctions de la machine, et enfin une sélection des solutions technologiques adéquates.

Le troisième chapitre est consacré à la conception à l'aide de logiciel SolidWorks et à la réalisation de la machine dans un atelier.

Le quatrième chapitre est consacré à la programmation et le fonctionnement de la machine.

Entre autres, le mémoire comporte aussi une conclusion générale, des références, une bibliographiques et l'annexe.

# **CHAPITRE I:**

## **Généralités sur les machines-outils à commande numérique (MOCN)**

## **- 1.1) Introduction à la commande numérique<sup>[1]</sup> :**

La commande numérique (CN) est une technique utilisant des données composées de codes alphanumériques pour représenter les instructions géométriques et technologiques nécessaires à la conduite d'une machine ou d'un procédé.

C'est également une méthode d'automatisation des fonctions des machines ayant pour caractéristique principale une très grande facilité d'adaptation à des travaux différents. À ce titre, la commande numérique constitue l'un des meilleurs exemples de pénétration du traitement de l'information dans les activités de production.

Exploitant au maximum les possibilités de la micro-informatique, toutes les données sont traitées en temps réel, c'est-à-dire au moment où elles sont générées, de manière à ce que les résultats du traitement contribuent également à piloter le processus.

Après une première génération de commandes numériques à logique câblée, sont apparues les commandes numériques par ordinateur (CNC), ou par ordinateur, qui intègrent un ou plusieurs ordinateurs spécifiques pour réaliser tout ou en partie des fonctions de commande.

Tous les systèmes de commande numérique commercialisés actuellement contenant au moins un microprocesseur, les termes CN et CNC peuvent être considérés comme des synonymes.

## **- 1.2) Historique<sup>[1]</sup> :**

Les travaux menés par Falcon et Jacquard à la fin du XVIIIe siècle ont montré qu'il était possible de commander les mouvements d'une machine à partir d'informations transmises par un carton perforé. Leur métier à tisser de 1805 fut le premier équipement à être doté de cette technique et, de ce point de vue, il peut être considéré comme l'ancêtre de la commande numérique.

Il faut cependant rattacher l'exploitation industrielle de la CN au développement de l'électronique.

En 1947, à Traverse City dans l'État du Michigan, John Parsons fabrique pour le compte de l'US Air Force des pales d'hélicoptère par reproduction. Pour façonner ses gabarits, il utilise une méthode consistant à percer plusieurs centaines de trous faiblement espacés de manière à approcher le profil théorique. L'emplacement et la profondeur de chaque trou sont calculés

avec précision par un ordinateur IBM à cartes perforées. La finition de la surface est obtenue par des opérations manuelles de polissage.

Mais, lorsque l'US Air Force confie à ce même Parsons la réalisation de pièces de formes encore plus complexes pour ses futurs avions supersoniques, celui-ci réalise que sa méthode est trop approximative et que seul un usinage continu en 3 dimensions sera en mesure de donner satisfaction.

Au printemps 1949, il confie alors au Massachusetts Institute of Technology (MIT) le soin de développer des asservissements capables de piloter une machine qui recevra des instructions intermittentes à partir d'un lecteur de cartes.

Cette machine, une fraiseuse prototype Cincinnati à broche verticale, conçue pour exécuter des déplacements simultanés suivant 3 axes, est officiellement présentée en septembre 1952 dans le Servomechanisms Laboratory du MIT. L'information mathématique étant la base du concept, on lui donne le nom de « *numerical control* ».

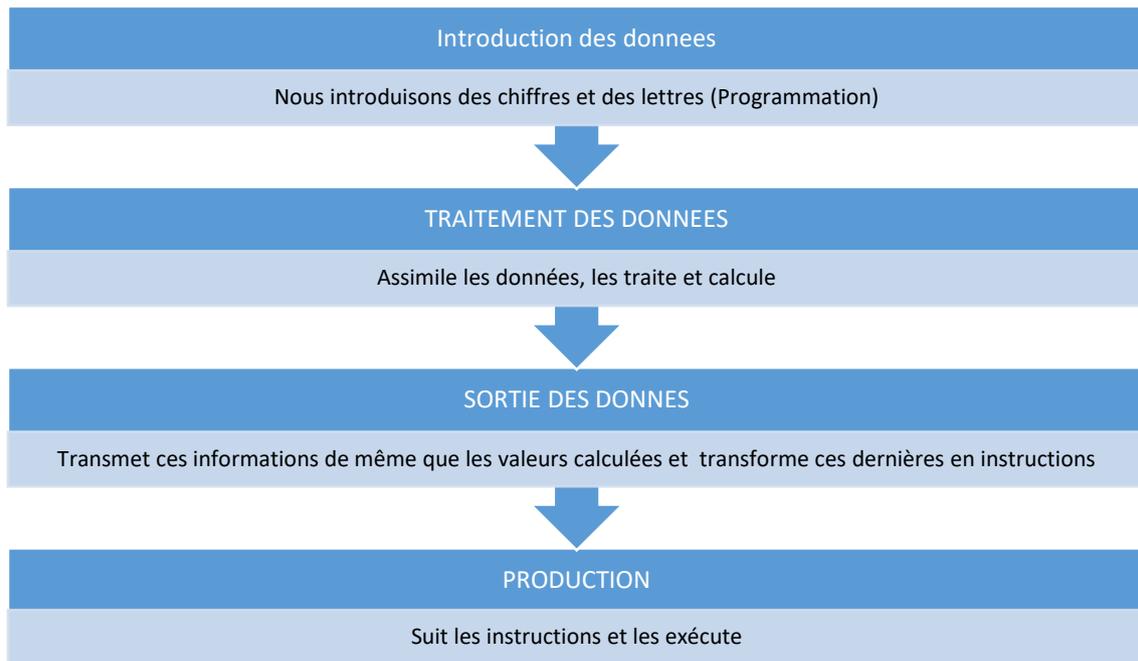
Il faut encore attendre quelques années de vastes fonds de l'US Air Force et l'appui des chercheurs du MIT pour rendre la première Machine-outil à commande numérique (MOCN) réellement opérationnelle.

Les différentes étapes de développement de la CN sont les suivantes:

- 1954 : Bendix acquiert le brevet de Parsons et fabrique la première CN industrielle.
- 1955 : à Font du Lac (Wisconsin), le constructeur américain Giddins & Lewis commercialise la première MOCN.
- 1959 : apparition de la CN en Europe (foire de Hanovre). Le MIT annonce la création du langage de programmation APT (Automatic Programed Tools).
- 1960 : apparition du système DNC (Direct Numerical Control).
- 1964 : en France, la Télémécanique Électrique lance la CN NUM 100 conçue à base de relais Téléstatic.
- 1968 : la CN adopte les circuits intégrés ; elle devient plus compacte et plus puissante. Le premier centre d'usinage est mis en vente par Kearney & Trecker (USA).
- 1972 : les mini calculateurs remplacent les logiques câblées ; la CN devient CNC. 1976 : développement des CN à microprocesseurs.

- 1984 : apparition de fonctions graphiques évoluées et du mode de programmation conversationnel, début de l'ère de la fabrication assistée par ordinateur (FAO).
- 1986 : les CN s'intègrent dans les réseaux de communication, début de l'ère de la fabrication flexible (CIM : computer integrated manufacturing).
- 1990 : développement des CN à microprocesseurs 32 bits.

### - 1.3) Définition d'une MOCN <sup>[1]</sup> :



Une machine-outil à commande numérique est une machine totalement ou partiellement automatique à laquelle les ordres sont communiqués grâce à des instructions codées portées sur un support matériel (ruban perforé, bande ou disque magnétique,...).

### - 1.4) Impact industriel <sup>[1]</sup> :

L'utilisation de la commande numérique ne se limite pas aux machines-outils travaillant par enlèvement de matière avec des outils coupants. Elle est présente sur des installations de découpe par faisceau laser, en électroérosion que ce soit en défonçage ou en découpe par fil, en poinçonnage ou pliage de produits en feuille, pour la mise en place de composants, lors des opérations d'assemblage... Elle sert aussi à piloter des tables traçantes, les machines à mesurer tridimensionnelles, les robots.

Elle augmente l'efficacité des opérations de fabrication tout en réduisant les coûts, cela permet également à une seule installation de produire une variété de produit et d'augmenter la production.

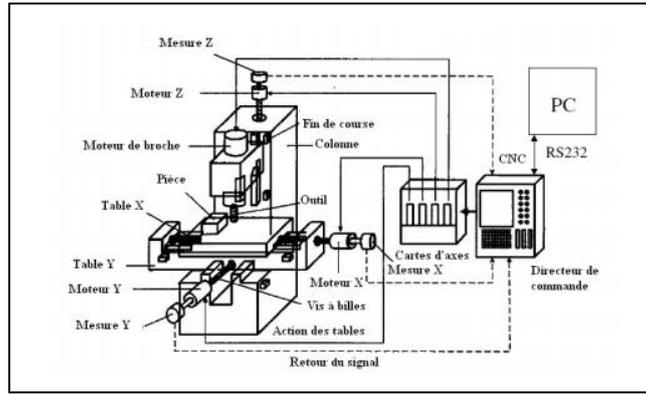


Figure 1. 1 : Représentation schématique d'un équipement à commande numérique [1]

### - 1.5) L'usinage conventionnelle et numérique [1] :

Un exemple pratique des temps de réalisation d'une pièce sur machine à commande numérique a abouti aux résultats suivants:

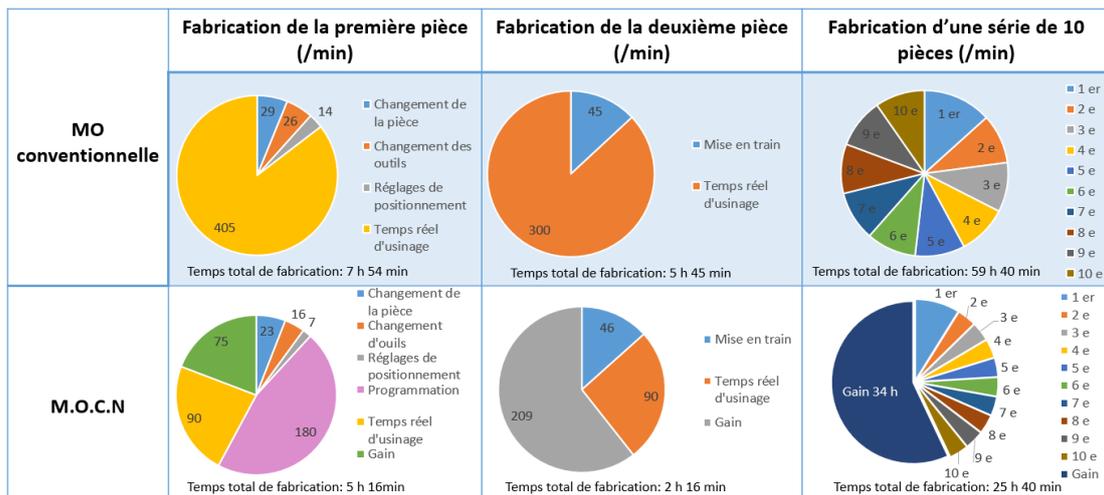


Figure 1. 2 : Comparaison de temps d'usinage sur une machine conventionnelle et une machine CN [1]

Ces avantages sont dus aux apports techniques de la commande numérique, et sont d'autant plus perceptibles que la programmation assistée a réduit les contraintes de temps et de coût de programmation, elle permet :

- De reporter à l'extérieur du poste de travail, donc de les effectuer en temps masqués, des tâches qui étaient faites sur site.
- De réduire les temps morts par enchaînement automatique des séquences d'usinage: par les mises en position des outils à vitesse d'avance rapide, par la possibilité de procéder à des changements.
- De supprimer des opérations qui étaient nécessaires pour effectuer un travail précis: traçage, utilisation de lunettes à pointer.

- De n'avoir plus besoin de certains types d'outillages : gabarits de pointage, masters ou modèles pour les opérations de copiage.
- De réaliser des surfaces complexes en gérant des déplacements sur plusieurs axes simultanément et ainsi de pouvoir concevoir des pièces avec des géométries plus proches des nécessités fonctionnelles.
- De définir aisément des conditions opératoires optimales puisqu'elle offre la possibilité de faire varier en continu les vitesses et ainsi d'accroître la durée de vie des outils.
- D'atténuer le facteur humain et d'apporter ainsi la répétitivité et une plus grande précision d'exécution, ce qui entraîne une diminution des tâches de contrôle.
- De parvenir à la flexibilité du fait des facilités offertes par l'évolution technique en matière de modes de chargement des programmes et de stockage des données : tous les directeurs de commande offrent la possibilité de se connecter directement à un ordinateur et ainsi de parvenir à une continuité de traitement des données (systèmes de CFAO : conception et fabrication assistées par ordinateur).
- D'intégrer des équipements périphériques (banc de mesure des outils, manipulateurs ou robots, ...) ou d'intégrer ce type de machines-outils dans des ensembles automatisés plus vastes (cellules ou îlots flexibles).automatiques d'outils, par l'emploi de la variation continue de vitesses.

Une autre façon de percevoir l'intérêt économique de la commande numérique est d'évaluer le temps où une machine-outil effectue le travail pour lequel a été conçue à savoir enlever de la matière, c'est-à-dire faire des copeaux. Analyse sur les temps de production effective :

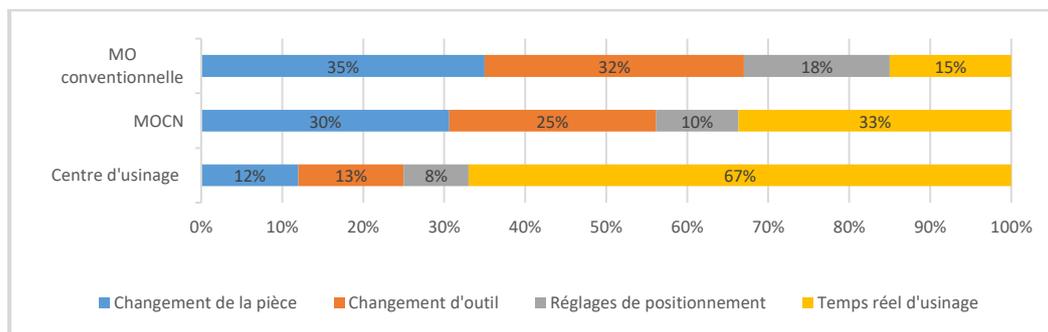


Figure 1. 3 : Productivité comparée de diverses machines en fonction de leur niveau d'automation <sup>[1]</sup>

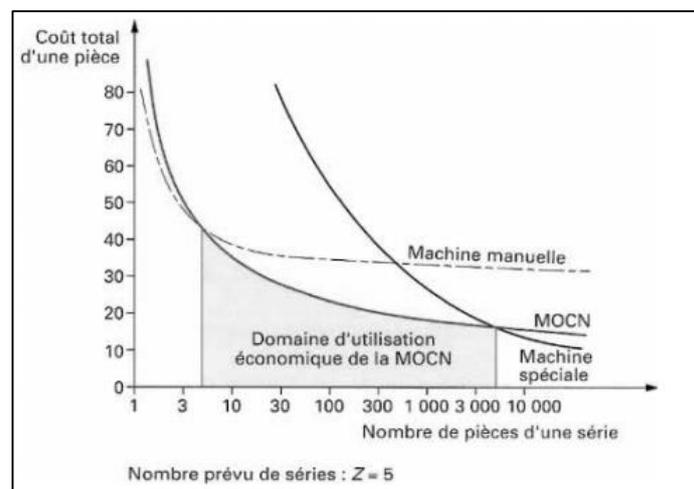
### - 1.6) Domaine d'utilisation <sup>[1]</sup> :

Le système de fabrication le plus rentable est celui qui engendre le coût d'une pièce le plus bas. Ce coût est calculé par la formule suivante :

$$C=Cu+Cr/L+Cp/ZL$$

Avec :

- C : coût total de fabrication pour une pièce.
- Cu : coût d'usinage d'une pièce (matière, main d'œuvre directe, coût machine).
- Cr : coût de lancement de la série et des réglages des outils et de la machine.
- L : nombre de pièces d'une série.
- Cp : coût de préparation (gammes et programmes d'usinage) et des outillages.
- Z : nombre de séries.
- ZL : nombre total de pièces fabriquées.



**Figure 1. 4 :** Domaine d'utilisation des machines-outils à commande numérique <sup>[1]</sup>

On constate que le coût total de fabrication par pièce varie en fonction de la quantité ZL d'une manière hyperbolique.

Si l'on considère le nombre de pièces usinées, le domaine d'utilisation économique de la machine-outil à commande numérique se situe dans la petite et la moyenne séries. Les machines-outils conventionnelles restent rentables pour des opérations simples où elles ont malgré tout tendance à être remplacées par des MOCN d'entrée de gamme.

Pour les grandes séries, le recours à des machines spéciales à automatisation rigide (machines transfert, tours à cames, fraiseuses de copiage) se montre encore très avantageux.

Si l'on représente le coût d'une pièce en fonction du nombre d'exemplaires à fabriquer, on peut déterminer les limites économiques d'utilisation de la commande numérique. Dans l'exemple de la figure 1.4, au-dessus de 5 pièces par série, l'usinage sur une MO à commande manuelle est plus rentable que sur une MOCN ; de la même façon, une machine spéciale le sera au-dessus de 5 000 pièces par série.

## - 1.7) Mode d'usinage alternatif [2]:

### - 1.7.1) Définition [2] :

A l'origine, à la fin des années 80, ce sont les travaux de recherche initiés par le Professeur Claude Barlier et son équipe qui ont conduit au procédé breveté de Stratoconception, en 1991. Stratoconception est le procédé de fabrication additive de type solide/solide qui permet la fabrication, couche par couche, d'un objet dessiné en CAO, sans aucune rupture de la chaîne numérique. Le procédé consiste en la décomposition automatique de

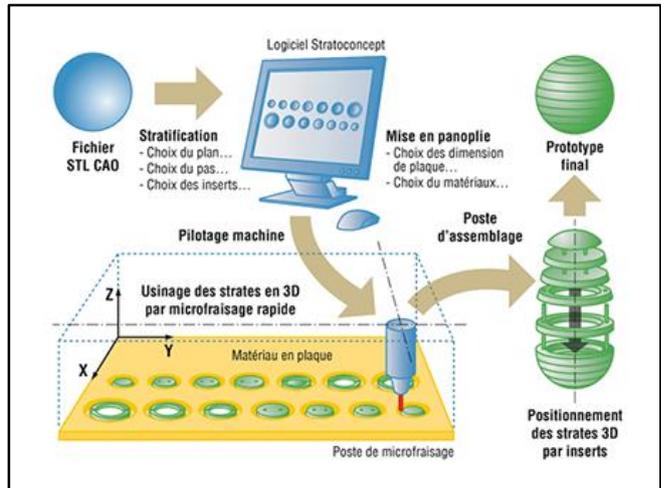


Figure 1. 5 : Diagramme de la stratoconception [2]

l'objet en une série de couches élémentaires complémentaires appelées strates, dans lesquelles sont placés des inserts de positionnement et des renforts. Chacune de ces strates est directement mise en panoplie puis fabriquée par micro-fraisage rapide, par découpe laser, par découpe au fil, ou par tout autre moyen de découpe à partir de tous matériaux en plaques.

Toutes ces strates sont ensuite positionnées par des inserts, des pontets ou par des éléments d'imbrication et assemblées afin de reconstituer la pièce finale. L'assemblage des strates est pris en compte dès l'étape de conception afin d'assurer la tenue aux contraintes mécaniques pendant l'utilisation. Les inserts servent à la fois de pions de positionnement et de liens entre les strates. Dans le cas de pièces à parois minces, ils sont placés à l'extérieur de la pièce par l'intermédiaire de pontets sécables. Dans certains cas, il est également possible d'imbriquer les strates les unes dans les autres et d'incorporer des canaux, des cellules, des busages voire d'intégrer des capteurs.

Le procédé est rapide et sans limitation de forme, de matériau ou de taille. Il permet la fabrication de pièces massives avec contre-dépouilles qui ne pourraient pas être fabriquées avec des procédés conventionnels. Il peut être utilisé aussi bien pour la fabrication de pièces mécaniques, de maquettes, de modèles et aussi d'outillages. Il trouve donc des applications en prototypage, en outillage et en fabrication rapide.

### **- 1.7.2) Les avantages [2]:**

- Coût de la machine très faible (2,5 axes).
- Approvisionnement facile de la matière à un prix industriel très compétitif (pas de matière captive).
- Développer des applicatifs métiers (ex: Orthostrato pour les prothésistes et orthopédistes, CASPER pour PSA).
- Préparation réduite des fichiers à traiter.
- Formation de l'opérateur est limitée à quelques jours.
- Intégration possible du procédé dans un environnement de type bureau d'étude.
- Nombreux types de pièces réalisées par ce procédé: maquettes, prototypes fonctionnels et technologiques, moules, modèles, pièces mécaniques, outillages...
- Temps de réalisation des prototypes ou outillages réduits.
- Coût d'une pièce bon marché par rapport aux autres procédés.
- Procédé non polluant qui optimise la matière et permet le recyclage des déchets.

### **- 1.7.3) Originalité [2]:**

- Couches 3D réalisées à partir de plaques rigides.
- Possibilité d'imbrication de strates de formes complexes.
- Nécessite une très faible puissance de micro-fraisage rapide (600W).
- Grande variété de matériaux en plaques (bois, plastiques, métaux ferreux et non ferreux,...) possibilité de bonne matière.
- Permet d'obtenir des pièces de petites et surtout de grandes dimensions (de 2000\*3000 mm, voire au-delà), non limitées en Z.
- Possibilité de conception interne des outillages.

Possibilité d'intégrer directement dans l'outillage tous les systèmes de régulation et de refroidissement et ceci de manière beaucoup plus optimisée.

#### - 1.7.4) Les modes de stratification [2] :

Le mode de stratification 3D est une innovation majeure du procédé de Stratoconception.

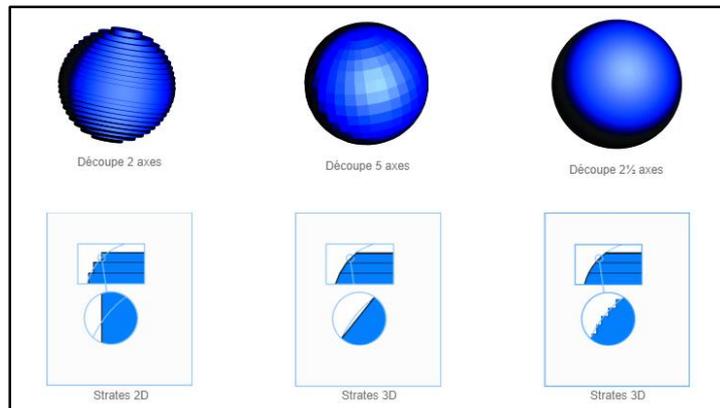


Figure 1. 6 : Différence entre les méthodes d'usinage [3]

#### - 1.8) La M.O.C.N [3]:

##### - 1.8.1) La structure d'une M.O.C.N [3] :

Comme pour tout système automatisé, nous pouvons décomposer la structure d'une MOCN en deux parties principales : la partie opérative et la partie commande.

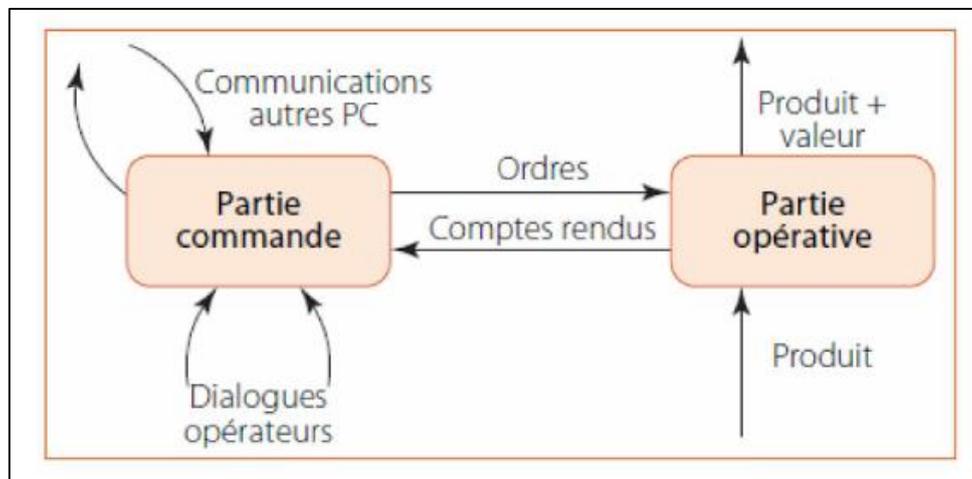


Figure 1. 7 : Structure d'une MOCN [3]

##### - 1.8.1.1) La partie opérative [3] :

La partie opérative (notée PO) comprend principalement un ou plusieurs mobiles, appelés tables ou chariots, liés au bâti ou entre eux par des liaisons glissières ou pivots. La position des mobiles est détectée par un capteur de position et leur vitesse est mesurée en permanence. On donne à ce sous-ensemble de partie opérative le nom d'axe numérique.

### **- 1.8.1.2) La partie commande <sup>[3]</sup> :**

Les différentes opérations, constituant la tâche d'usinage, sont gérées par l'intermédiaire d'un DCN (direct numerical control).

### **- 1.8.1.3) DCN (Direct Numerical Control) <sup>[3]</sup> :**

Ces systèmes permettent le pilotage de plusieurs machines à partir d'un ordinateur.

### **- 1.8.2) Principe de fonctionnement d'une MOCN <sup>[3]</sup> :**

Une commande numérique (CN) est un automatisme programmable, assurant généralement la commande des vitesses et le contrôle en vitesse et position des organes mobiles d'une machine.

Elle comporte alors deux boucles d'asservissement et un bloc logique avec calculateur (CNC : Computer Numerical Control).

Le DCN (direct numerical control) est une machine informatique assurant principalement deux fonctions :

#### **- 1.8.2.1) L'entrée des informations <sup>[3]</sup> :**

- Entrée du programme : manuelle au clavier ou par disquette, par liaison câblée avec ordinateur externe.
- Analyse du programme : lecture, interprétation, contrôle syntaxe.

#### **- 1.8.2.2) Les fonctions de commande <sup>[3]</sup> :**

Elaboration des valeurs de consigne (ordres) de 2 types :

- informations numériques (déplacement, vitesse d'avance...).
- informations « tout ou rien » : automatismes divers (arrosage, rotation broche...).

A partir d'un programme préalablement établi, le DCN fournit des ordres (tension électrique, suite d'impulsions...) aux commandes des moteurs d'axes et de broche.

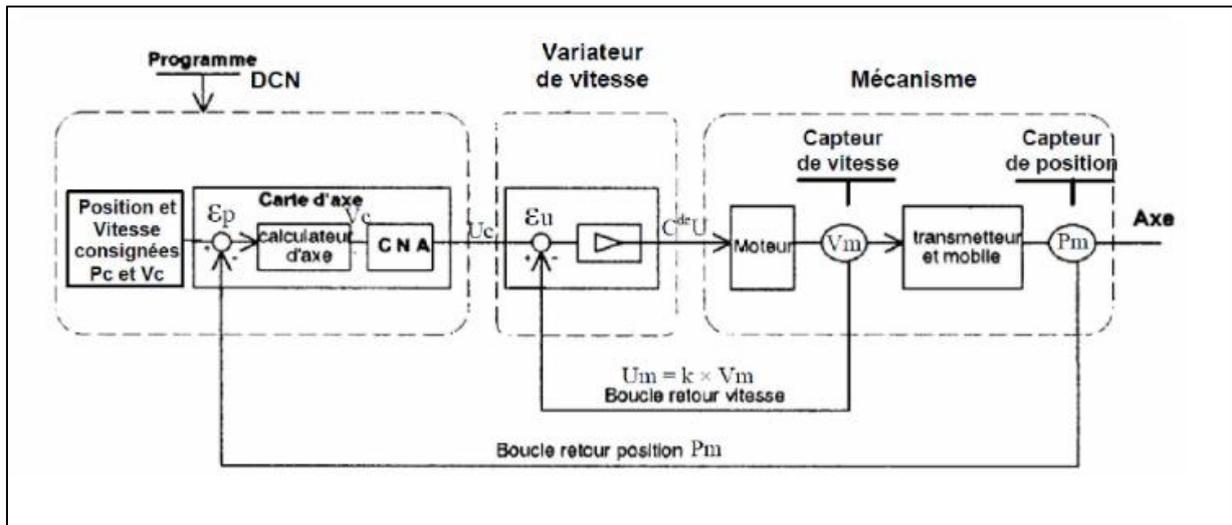


Figure 1. 8 : Sous-ensembles technologiques d'un axe numérique <sup>[3]</sup>

Symboles	Définition	Symboles	Définition
	Comparateur	CNA	Convertisseur Numérique Analogique
	Amplificateur	U <sub>c</sub>	Tension consignée
P <sub>c</sub>	Position consignée	V <sub>m</sub>	Vitesse mesurée
V <sub>c</sub>	Vitesse consignée	U <sub>m</sub>	Tension mesurée
P <sub>m</sub>	Position mesurée	ε <sub>u</sub>	Ecart de tension
ε <sub>p</sub>	Ecart de position	C <sup>de</sup> U	Commande du moteur en tension

Tableau 1. 1 : Symboles et définition de figure 8 <sup>[3]</sup>

### - 1.8.3) Eléments de la partie opérative <sup>[3]</sup> :

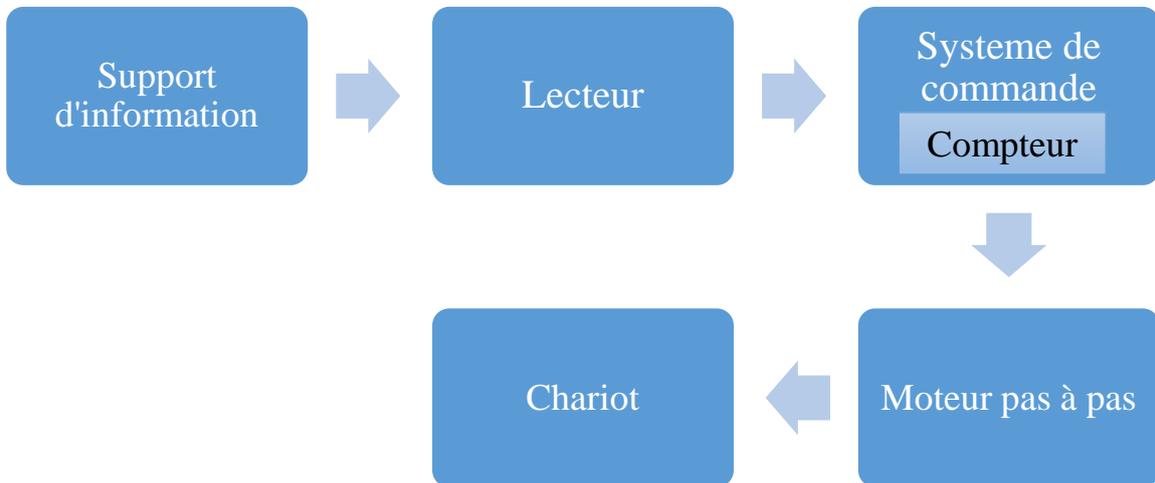
La partie opérative comporte :

- Les axes de déplacements.
- Le système porte pièce.
- Le système porte outil.

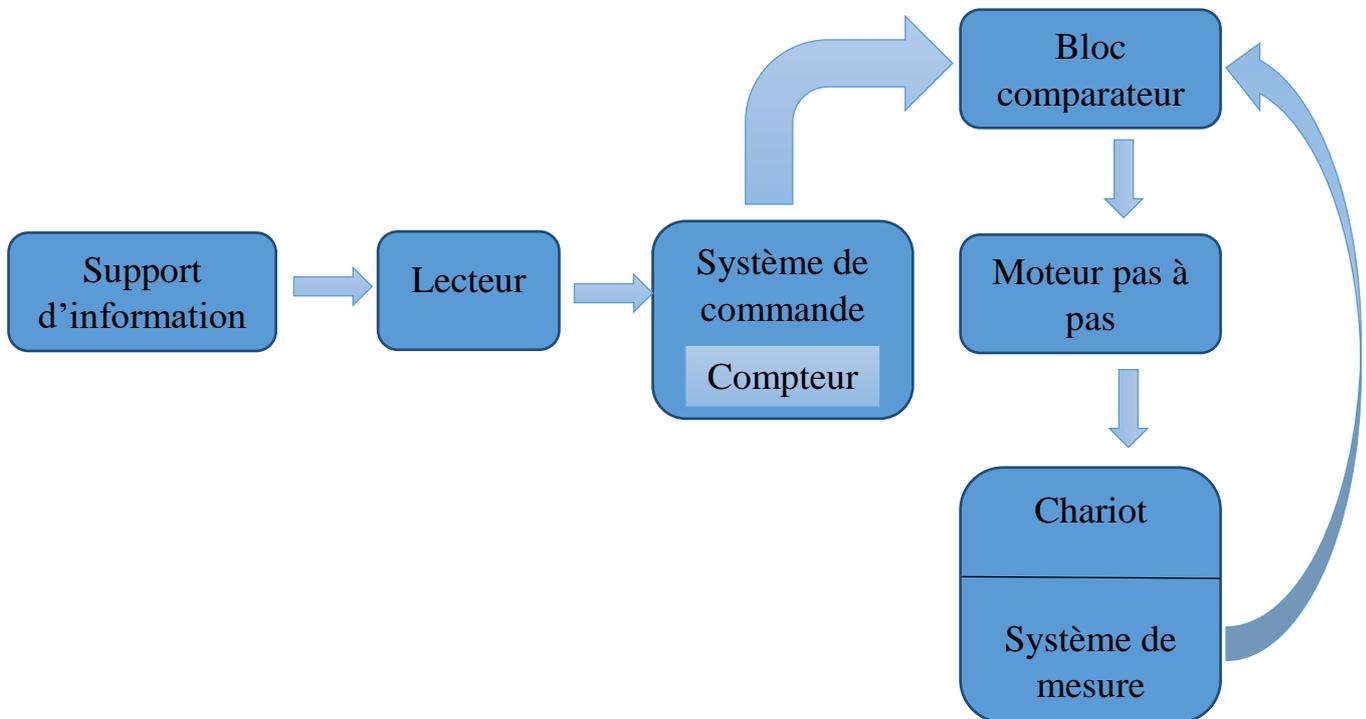
#### - 1.8.4) Système de commande <sup>[3]</sup> :

Il y a deux systèmes de commande :

- Système à boucle ouverte :



- Système à boucle fermée :



### - 1.9) Les différents types de Machine CNC à 3 axes:

Il y a principalement deux types de machines CNC à 3 axes traditionnelles, On a les machines de type 1 ou la table de travail se déplace dans l'axe Y et le portique est fixe dans cet axe.



Figure 1. 9 : Machine CNC de type 1

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nous pouvons utiliser moins de moteur pas à pas pour le déplacement selon l'axe Y, car la table est plus légère que le portique.</li> <li>• Moins chère, si nous utilisons 1 moteur pas à pas pour le déplacement selon l'axe Y.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La machine doit être plus grande dans la direction Y en relation avec la surface de travail en tenant compte les dimensions de la table.</li> <li>• La machine sera plus lourde.</li> </ul>

Tableau 1. 2: Avantages et inconvénients de machine type 1

Et il y a des machines de type 2 où le portique se déplace dans l'axe Y et la table de travail est fixe, Pour notre cas, nous avons choisi d'utiliser la machine de type 2, pour satisfaire nos besoins d'une machine légère, portable et compact.



Figure 1. 10 : Machine CNC de type 2

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La machine peut être plus petite car le rapport entre le surface de travaille et le cadre est plus proche à 1.</li> <li>• La machine sera plus légère car nous n'avons pas besoin de compenser les dimensions de la table.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A cause de poids du portique, soit nous devons utiliser deux moteurs pas à pas pour se déplacer dans la direction Y, ou un moteur plus grand avec un système de courroie.</li> <li>• La machine sera plus chère.</li> </ul>

Tableau 1. 3: Avantages et inconvénients de machine type 2

### - 1.10) L'apport <sup>[4]</sup>:

Le jeu est une propriété inhérente aux assemblages de vis trapézoïdale en raison du mouvement de glissement entre la vis et l'écrou. Pour certaines applications, une certaine quantité de jeu peut être tolérée, mais des applications telles que le positionnement, la distribution ou l'assemblage nécessitent souvent un niveau de précision et de répétabilité qui ne peut être atteint en cas de jeu.

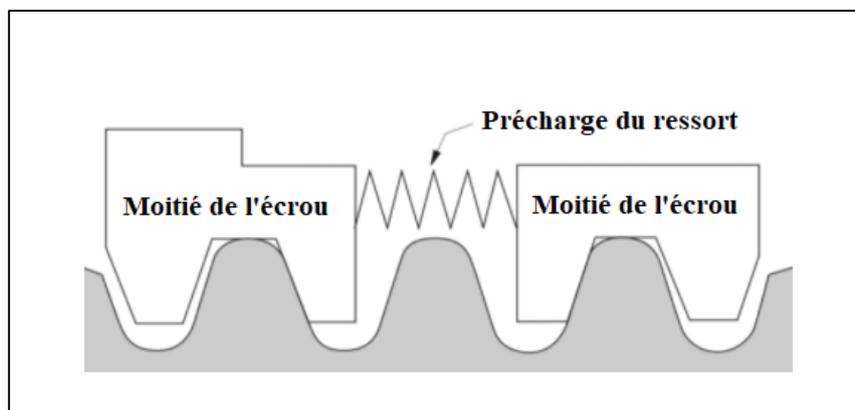
Pour répondre à ces applications, les fabricants de vis trapézoïdales ont développé des moyens de compenser le jeu, bien qu'il existe des inconvénients aux conceptions à jeu réduit ou à jeu nul.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rentable, Personnalisation et Écologique.</li> <li>• Faibles besoins d'entretien.</li> <li>• Conceptions d'écrou personnalisées.</li> <li>• Appel vertical, conçu pour être autobloquant à des fils bas.</li> <li>• Meilleur fonctionnement en termes de bruit et de vibrations.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Génération de chaleur plus élevée.</li> <li>• Efficacité réduite.</li> <li>• Durée de vie plus courte.</li> <li>• Augmentation du diamètre, de la longueur ou les deux de l'écrou.</li> <li>• Augmentation de frottement de glissement entre les composants.</li> </ul>

**Tableau 1. 4 :** Avantages et inconvénients de l'écrou anti-jeu

Les méthodes de compensation de jeu suivent généralement l'une des deux conceptions de base :

- La réduction du jeu reste constante pendant la durée de vie du vis-écrou.
- La méthode la plus élémentaire pour réduire ou éliminer le jeu de la vis trapézoïdale consiste à utiliser un ressort (ou un autre élément souple, tel qu'une rondelle) pour forcer axialement deux moitiés d'écrou contre les flancs opposés du filetage de la vis.



**Figure 1. 11 :** Diagramme de fonctionnement de l'écrou anti-jeu <sup>[4]</sup>

# **CHAPITRE II:**

## **Etude et calcul**

## Introduction:

Notre projet peut être séparé en trois parties :

- 1- L'étude et les calculs des composants normalisés.
- 2- L'étude et la conception des différents composants non normalisés de la machine virtuellement avec un programme CAO.
- 3- La réalisation des composants non normalisés et l'assemblage de la machine.

La 1<sup>re</sup> partie repose sur des calculs numériques, nous utilisons les catalogues fournis par les différents fournisseurs des composants normalisés.

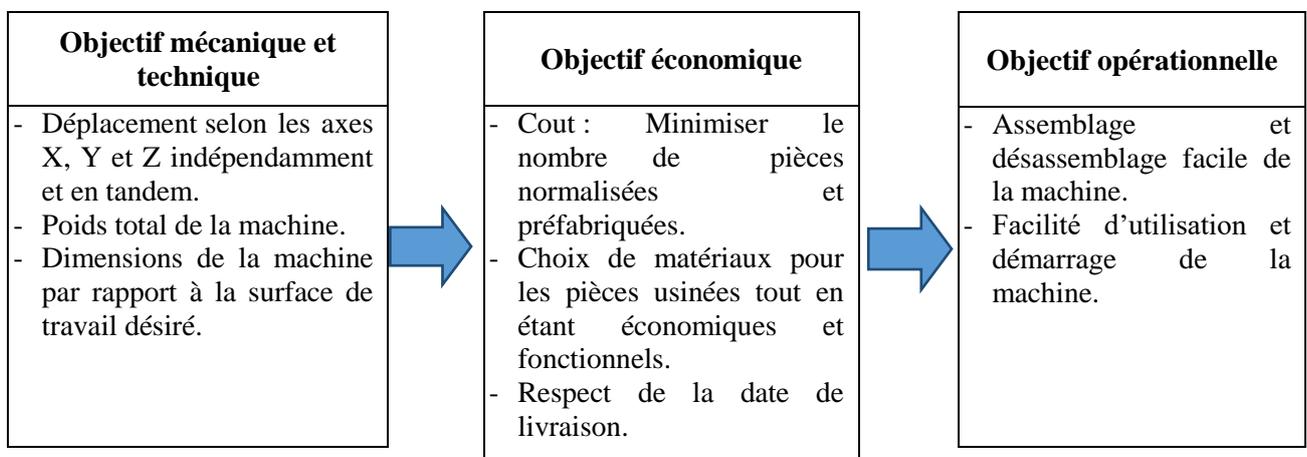
Afin de réaliser la 2<sup>e</sup> partie, nous avons utilisé le programme SolidWorks, il nous offre de nombreux avantages allant de commandes intuitives et simples à des fonctionnalités approfondies telles que le calcul du centre de masse de la machine, la génération de trajectoires d'outil et l'animation et les rendus 3D.

Pour la 3<sup>e</sup> partie, nous avons demandé l'aide d'un atelier pour l'accès aux machines et outils nécessaire et à un machiniste CNC pour le découpage des pièces en aluminium.

### - 2.1) Cahier de charge :

Le projet est fait dans le cadre de mémoire de fin d'étude avec le but de faire la conception et la réalisation d'une machine fraiseuse à commande numérique 3 axes.

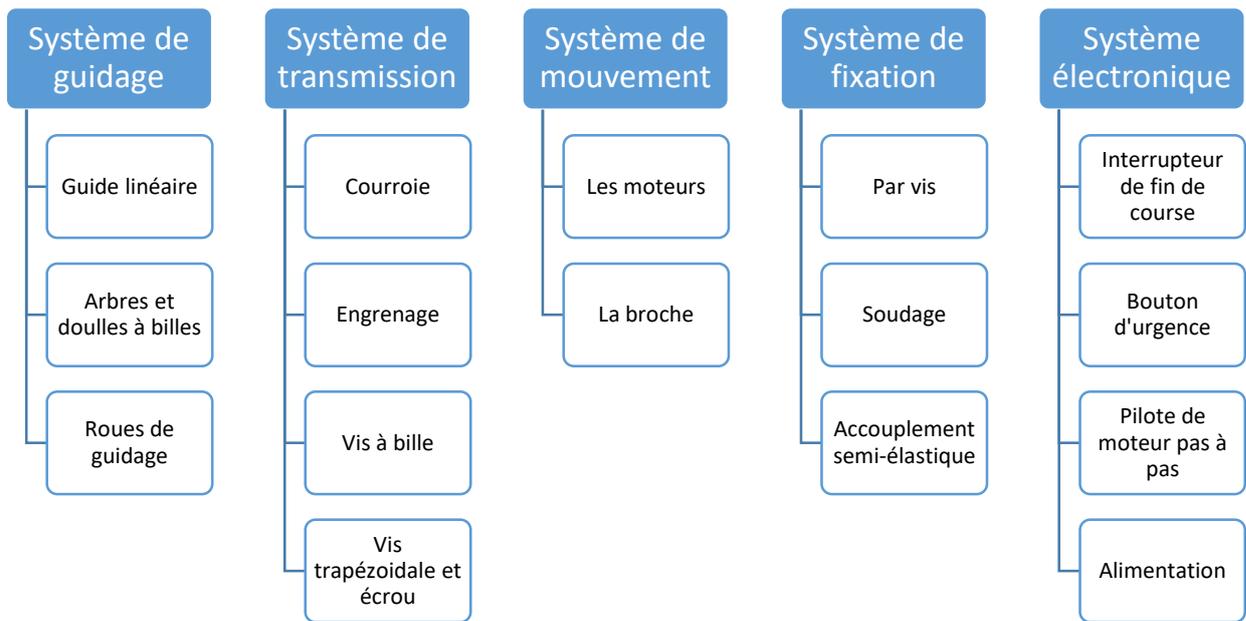
Afin d'atteindre ce but, nous mettons quelques objectifs à accomplir pour assurer le bon fonctionnement de la machine et un processus de conception et de construction fluide.



## - 2.2) Etude des composants normalisés :

### - 2.2.1) Solutions et options disponibles :

Nous avons plusieurs systèmes avec différents composants à considérer et chacun a des options, solutions et choix en ce qui concerne les pièces normalisées et préfabriquées qui répondent à nos besoins, et notre choix est basé sur les critères objectifs que nous avons défini dans les sections ci-dessus.



Nous avons référencé les catalogues des fabricants pour nous aider à choisir les composants qui répondaient le mieux à nos besoins en ce qui concerne les pièces préfabriquées.

On utilise SolidWorks pour la conception des pièces usinées.

### - 2.2.2) Système de guidage :

#### - 2.2.2.1) Arbres et douilles à billes <sup>[5]</sup>:



Figure 2. 1 : Arbres et douilles à billes

Pour faciliter un profil de mouvement linéaire on a besoin d'un moyen rapide et facile, la bague linéaire est un excellent choix, surtout si vous n'avez pas d'exigences de tolérance ou de précision élevées. Les arbres doivent être dimensionnés pour supporter la charge dans une tolérance de flexion acceptable - trop de poids et les arbres se plieront, provoquant une erreur de positionnement. Cependant, ces erreurs sont généralement faibles, de l'ordre de quelques millièmes de millimètre.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moins chère.</li> <li>• Facile à installer.</li> <li>• Maintenances et entretenir facile.</li> <li>• Frottement faible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potentiel d'erreurs de positionnement.</li> <li>• Problèmes à haute vitesse.</li> <li>• Capacité de charge faible.</li> </ul>

**Tableau 2. 1 :** Avantages et inconvénients des arbres et douilles à billes

#### - 2.2.2.2) Guide linéaire <sup>[5]</sup>:

Les applications exigeantes ont généralement des solutions avec des coûts élevés. Les guides linéaires offrent une grande capacité de charge et une plus grande rigidité pour deux raisons principales :

- Capacité de charge plus élevée grâce à la forme des rails.
- Pas de déflexion même un petit guide linéaire peut supporter 1000 Kg.



**Figure 2. 2 :** Guide linéaire

Les guides linéaires sont extrêmement précis, les erreurs sont généralement mesurées dans la gamme des micromètres. L'ajout d'une pré-charge dans le guide peut également augmenter la précision et la répétabilité. Au lieu d'avoir un petit jeu entre la chenille et les roulements à billes, un ajustement serré est utilisé.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Précision et répétabilité étonnantes.</li> <li>• Capacité de charge et rigidité plus élevées.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût plus élevé.</li> <li>• Problèmes de maintenances plus élevés.</li> </ul>

**Tableau 2. 2:** Avantages et inconvénients de guide linéaire

### - 2.2.2.3) Roues de guidage :

Ce type de système de guidage est généralement utilisé pour les systèmes qui n'ont pas beaucoup de vibrations ou les vibrations n'affectent pas la fonctionnalité du système comme les imprimant 3D.



**Figure 2. 3 :** Roues de guidage

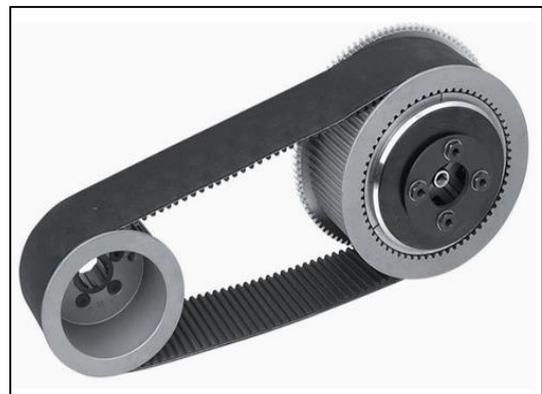
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moins cher que tout autre système.</li> <li>• Maintenances faible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacité de charge très basse.</li> <li>• Installation un peu plus compliquée.</li> <li>• Très faible résistance aux vibrations et température extrême.</li> </ul>

**Tableau 2. 3:** Avantages et inconvénients de Roues de guidage

### - 2.2.3) Système de transmission:

#### - 2.2.3.1) Courroie <sup>[6]</sup>:

Ce type de système utilise une courroie synchrone dentée en nylon renforcée avec des cordons en fibre de carbone. Les courroies sont associées à des pignons en acier inoxydable durables. Le résultat est un système d'entraînement incroyablement résistant, propre et durable qui nécessite très peu d'entretien. Il s'agit de la même technologie de courroie que celle utilisée dans les motos à entraînement par courroie, les moteurs de course automobile et en robotique.



**Figure 2. 4 :** Courroie

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintenance basse.</li> <li>• Longue durée de vie.</li> <li>• Propre et pas besoin de lubrification.</li> <li>• Silencieuse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût élevé.</li> <li>• Introduire des composants normalisés dans la machine.</li> <li>• Système de transmission plus compliqué.</li> </ul>

**Tableau 2. 4:** Avantages et inconvénients de courroie

### - 2.2.3.2) Chaîne et pignon [6]:

Elles sont constituées d'une relève de famille bonshommes de maillons inégaux disposés alternativement, les maillons intérieurs et les maillons extérieures.

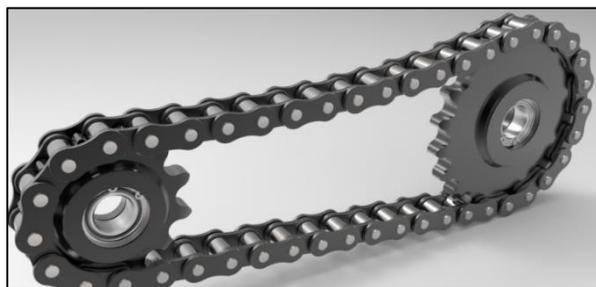


Figure 2. 5 : Chaîne et pignon

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permet l'ajustement.</li> <li>• Moins chère.</li> <li>• Facilement disponible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessite la lubrification.</li> <li>• Génère du bruit.</li> <li>• Augment le poids de la machine et la tension sur les moteurs.</li> </ul>

Tableau 2. 5: Avantages et inconvénients de chaîne et pignon

### - 2.2.3.3) Vis à billes [7]:

Les vis à billes sont des actionneurs linéaires mécaniques qui traduisent un mouvement de rotation en un mouvement linéaire en utilisant un mécanisme de recirculation de billes entre l'arbre de la vis et l'écrou. Un arbre fileté fournit un canal hélicoïdal pour les roulements à billes qui agissent comme une vis de précision.



Figure 2. 6 : Vis à billes

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très efficace, nécessitant moins de couple, donc un moteur plus petit.</li> <li>• Grades de précision plus élevés pour une plus grande précision de positionnement.</li> <li>• Frottement plus faible capable de fonctionner à des températures plus fraîches.</li> <li>• Peut être ajusté pour augmenter ou diminuer la pré-charge.</li> <li>• Longue durée de vie.</li> <li>• Disponible en diamètres de vis de 4mm à 80mm.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cout très élevés.</li> <li>• l'installation nécessite des précautions pour ne pas faire tomber les balles.</li> <li>• Très bruyant.</li> </ul>

Tableau 2. 6: Avantages et inconvénients de vis à billes

#### - 2.2.3.4) Vis trapézoïdale et écrou <sup>[7]</sup> :

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



Figure 2. 7 : Vis trapézoïdale et écrou

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

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

Tableau 2. 7: Avantages et inconvénients de vis trapézoïdale et écrou

#### - 2.2.4) Système de mouvement:

##### - 2.2.4.1) Les moteurs <sup>[8]</sup>:

Il existe plusieurs types de moteur et chacun a ses propres capacités avec ses forces et ses faiblesses :

	Moteur série CC	Moteur courant alternative	Moteurs à usage spécial
- Moteurs shunt CC	- Moteur CC à aimant permanent	- Moteur synchrone	- Moteur pas à pas
- Moteurs excité séparément	- Moteur composé à courant continu	- Moteur à induction	- Moteurs courant continue sans balais
			- Moteur à hystérésis
			- Moteur à réluctance
			- Moteur universel

Tableau 2. 8: Différents types de moteurs <sup>[8]</sup>

Pour nos besoins, nous avons opté pour les moteurs à usage spécial, spécifiquement avec les moteurs pas à pas.

#### - 2.2.4.2) Définition de moteur pas à pas [8] :

Un moteur pas à pas est un moteur électrique dont la caractéristique principale est que son arbre tourne en effectuant des étapes, c'est-à-dire en se déplaçant d'une quantité fixe de degrés. Cette caractéristique est obtenue grâce à la structure interne du moteur, et permet de connaître la position angulaire exacte de l'arbre en comptant simplement combien d'étapes ont été réalisées, sans besoin de capteur. Cette caractéristique le rend également adapté à une large gamme d'applications.

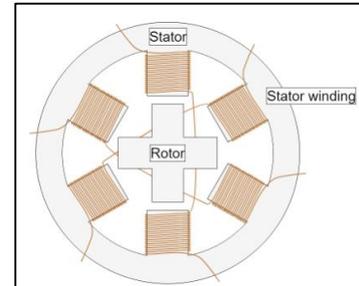


Figure 2. 8 : Diagramme d'un moteur pas à pas [8]

Il y a plusieurs types de moteurs pas à pas:

#### - 2.2.4.3) Moteur à aimant permanent [8]:

Le rotor est un aimant permanent qui s'aligne avec le champ magnétique généré par le circuit du stator. Cette solution garantit un bon couple ainsi qu'un couple de détente. Cela signifie que le moteur résistera le changement de position que la bobine soit ou non sous tension. L'inconvénient de cette solution est qu'elle présente une vitesse et une résolution inférieure par rapport aux autres types.

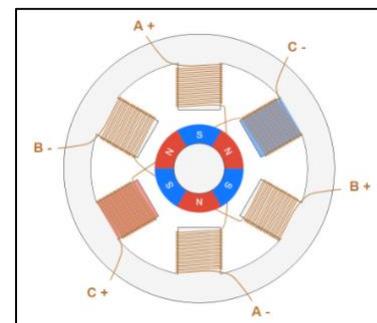


Figure 2. 9 : Diagramme d'un moteur à aimant permanent [8]

#### - 2.2.4.4) Moteur à réluctance variable [8] :

Le rotor est constitué d'un noyau de fer et à une forme spécifique qui lui permet de s'aligner avec le champ magnétique, Avec cette solution, il est plus facile d'atteindre une vitesse et une résolution plus élevées, mais le couple qu'elle développe est souvent plus faible et il n'a pas de couple de détente.

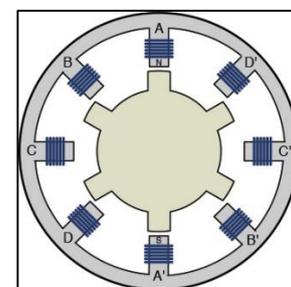


Figure 2. 10 : Diagramme d'un moteur à réluctance variable [8]

#### - 2.2.4.5) Rotor hybride [8]:

Ce type de rotor a une construction spécifique, et est un hybride entre les versions à aimant permanent et à réluctance variable. Le rotor comporte deux capuchons à dents alternées et magnétisé axialement. Ces performances supérieures nécessitent une construction plus complexe, et donc un coût plus élevé.

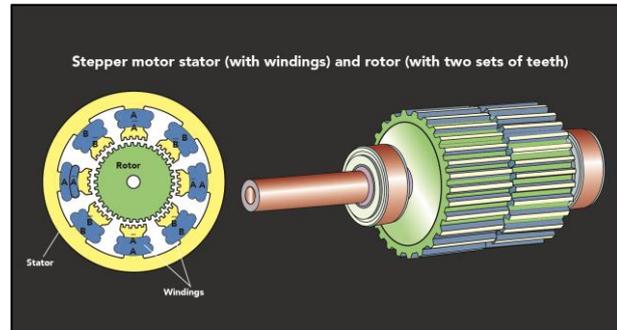


Figure 2. 11 : Diagramme d'un moteur hybride [8]

La dent S-aimantée s'aligne avec la dent N-magnétisée du stator. La structure est complexe, avec un nombre de dents plus élevé que celui montré sur la photo, bien que le principe de fonctionnement du moteur pas à pas soit le même. Le nombre élevé de dents permet au moteur d'atteindre un petit pas, jusqu'à  $0,9^\circ$ .

#### - 2.2.4.6) La broche :

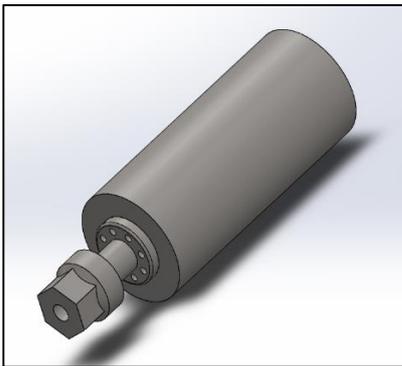


Figure 2. 12 : Rendu 3D de la broche

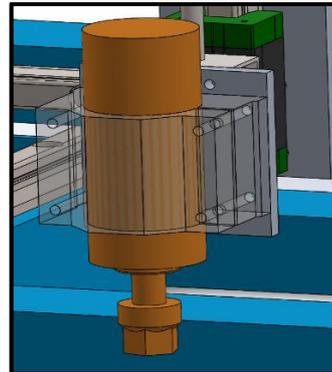


Figure 2. 13 : Emplacement de la broche dans la machine

Pour le système d'usinage on a utilisé une broche à prise manuelle très facile à utiliser et à manipuler vue ses petites dimensions et sa légèreté. Elle est dotée d'un variateur de vitesse couvrant une plage de 10000 tr/min à 32000 tr/min.

#### - 2.2.5) Système de fixation:

##### - 2.2.5.1) Soudage :

Le soudage est une méthode de montage permanent qui nous permet d'attacher deux composants ou plus l'un à l'autre, il nous permet d'obtenir une continuité de la nature des matériaux assemblés.



Figure 2. 14 : Soudage

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très bonne méthode d'assemblage.</li> <li>• Peut supporter un poids très lourd.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Montage permanent, pas de possibilité de démontage.</li> <li>• Le soudage de deux matériaux différents nécessite des compétences et des équipements spéciaux.</li> </ul>

**Tableau 2. 9:** Avantages et inconvénients de soudage

### - 2.2.5.2) Vis et écrou :

Le montage par vis est un moyen très pratique de fixer les composants les uns aux autres tout en gardant la structure saine, fonctionnelle, simple et facile à assembler et démonter. Il se compose d'une tige filetée et d'un écrou avec le type de filetage correspondant, il nous permet également de fixer des composants de différents matériaux l'un à l'autre comme l'aluminium et l'acier, qui ne peuvent pas être soudés ensemble.



**Figure 2. 15 :** Vis et écrou

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilement disponible, Solide, robuste et peu coûteux.</li> <li>• Peut supporter des charges très élevées</li> <li>• Montage non permanent, possibilité de démontage.</li> <li>• Ne nécessite aucune compétence particulière.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La possibilité de se desserrer si le system vibre.</li> <li>• le composant nécessite une considération de conception pour serrer la vis.</li> </ul>

**Tableau 2. 10:** Avantages et inconvénients de vis et écrou

### - 2.2.5.3) Accouplement semi-élastiques <sup>[17]</sup>:

Pour le contact en révolution entre les arbres moteurs et les vis trapézoïdales, on a utilisé des accouplements semi-élastiques. Ceux-ci permettent de rattraper de petits défauts d'alignement (typiquement les défauts d'usinage).

Ces accouplements sont généralement constitués de deux parties rigides solidaires des arbres et d'une partie légèrement adaptable qui rattrape les défauts d'alignement.

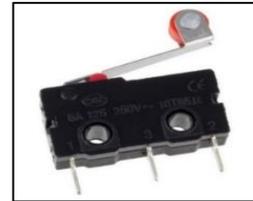


**Figure 2. 16:** Accouplement semi-élastiques

## - 2.2.6) Système électrique:

### - 2.2.6.1) Les interrupteurs de fin de course <sup>[9]</sup> :

Les interrupteurs de fin de course sont utilisés pour détecter automatiquement la présence d'un objet ou pour surveiller et indiquer si les limites de mouvement de cet objet ont été dépassées.



**Figure 2. 17 :**  
Interrupteur de fin de course

### - 2.2.6.2) Bouton d'urgence <sup>[10]</sup> :

Un bouton d'arrêt d'urgence est un dispositif de sécurité qui éteint toutes les machines d'un atelier instantanément lorsque le bouton d'arrêt d'urgence est enfoncé. Il permet à quiconque d'éteindre une machine n'importe où dans un atelier pour éviter un accident.



**Figure 2. 18 :** Bouton d'urgence

### - 2.2.6.3) Pilote de moteur pas à pas :

Pour les pilotes des moteurs pas à pas nous avons utilisé le model SH-DM542.

Ces pilotes nous permettent de contrôler l'ampérage, la direction et le micros-pas des moteurs pas à pas.



**Figure 2. 19 :** Carte de commande SH-DM542

### - 2.2.6.4) Alimentation :

Pour notre alimentation, nous en choisissons une avec 24 volts et 20 ampères, ce qui est plus que suffisant pour notre configuration actuelle et nous donne une certaine liberté pour améliorer nos composants électriques à l'avenir.



**Figure 2. 20 :** Alimentation électrique

## - 2.3) Calculs des elements:

### - 2.3.1) Calcul des masses:

Pour effectuer un bon calcul, on doit d'abord calculer la masse totale supporté par chaque axe de la machine, pour les composants standardisé comme les vis et les écrous, on peut tirer leurs masses depuis les différents catalogues.

- Pour les composants préfabriqués et les composants électriques, on peut utiliser les valeurs trouvées sur leurs fiches techniques.
- Quant aux pièces conçues et fabriquées par nos soins, nous utilisons la fonction de calcul de masse du logiciel SolidWorks 2020, qui nous donne une très grande précision de calcul et nous obtenons ces résultats :

<b>Axe Z</b>		
<b>m<sub>i</sub></b>	<b>Nom de pièce</b>	<b>Mass (Kg)</b>
<b>m<sub>1</sub></b>	Vis trapézoïdale Z+ écrou + accouplement	0.176
<b>m<sub>2</sub></b>	Bloc de chariot de rail linéaire	0.532
<b>m<sub>3</sub></b>	Support de vis trapézoïdale+ roulement	0.146
<b>m<sub>4</sub></b>	Plaque de montage de la broche	0.162
<b>m<sub>5</sub></b>	Support de montage de la broche	0.489
<b>m<sub>6</sub></b>	Broche	2.166
Totale		3.671

**Tableau 2. 11** : Masses des composants de l'axe Z

<b>Axe X</b>		
<b>m<sub>i</sub></b>	<b>Nom de pièce</b>	<b>Mass (Kg)</b>
<b>m<sub>1</sub></b>	Vis trapézoïdale Z+ écrou + accouplement	0.237
<b>m<sub>2</sub></b>	Bloc de chariot de rail linéaire (x2)	1.065
<b>m<sub>3</sub></b>	Support de vis trapézoïdale	0.137
<b>m<sub>4</sub></b>	Plaque de support de l'axe Z	0.376
<b>m<sub>5</sub></b>	Moteur pas à pas + Support de montage	1.056
<b>m<sub>6</sub></b>	Rail linéaire de l'axe Z	0.646
<b>m<sub>7</sub></b>	Les composants de l'axe Z	3.671
Totale		7.188

**Tableau 2. 12** : Masses des composants de l'axe X

Axe Y		
$m_i$	Nom de pièce	Mass (Kg)
$m_1$	Vis trapézoïdale Y+ écrous + accouplements (x2)	0.474
$m_2$	Support de vis trapézoïdale (x2)	0.177
$m_3$	Bloc de chariot de rail linéaire (x2)	1.065
$m_4$	Support des rails linéaire de l'axe X (x2)	3.085
$m_5$	Rail linéaire de l'axe X (x2)	3.123
$m_6$	Plaques de support de portique	1.270
$m_7$	Moteurs pas à pas	0.700
$m_8$	Les composants de l'axe X	7.479
Totale		17.82

Tableau 2. 13 : Masses des composants de l'axe Y

### - 2.3.2) Calcul du centre de gravité de la machine:

Nous devons calculer le centre de gravité de la machine dans l'extrémité le long de l'axe Y pour s'assurer qu'elle ne bascule pas lorsqu'elle atteint la fin de sa course.

Pour faciliter le calcul nous pouvons utiliser la fonction de calcul des mass appelé « Propriété des masses » du logiciel SolidWorks 2020.

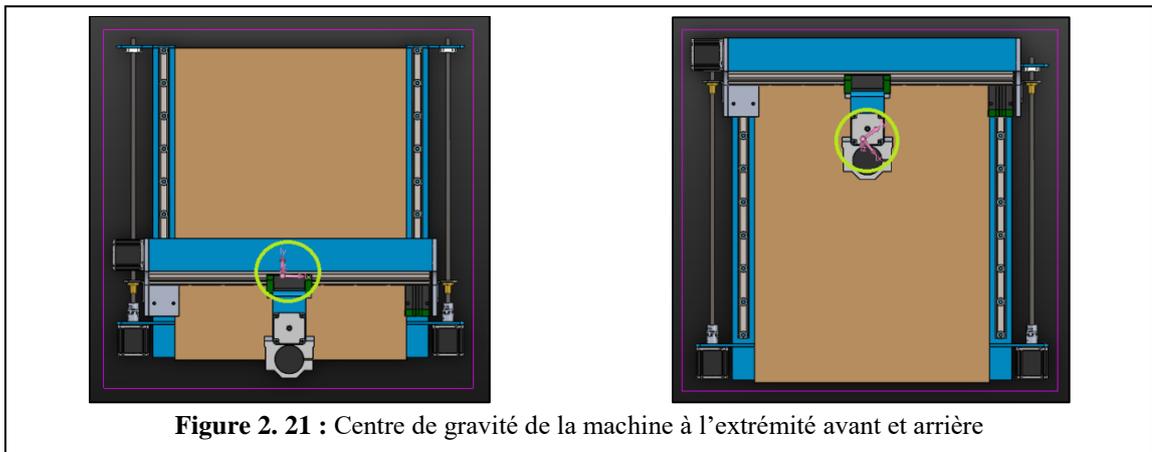


Figure 2. 21 : Centre de gravité de la machine à l'extrémité avant et arrière

D'après les calculs précédents, nous pouvons déterminer que la machine sera stable et ne bascule pas lors de fonctionnement aux extrémités de son fonctionnement.

### - 2.3.3) Calculs sur les vis trapézoïdales:

- *Dimensionnement à l'usure* : La puissance totale transmise à la vis ( $P_t$ ) est rendue comme puissance utilisable ( $P_u$ ) sur l'écrou. Le rapport  $P_u/P_t = \eta$  définit l'efficacité du système qui dépend du coefficient de frottement entre les surfaces en contact de la vis et de l'écrou et l'angle d'hélice du filetage.

A cause du frottement de glissement, une portion de la puissance utilisable ( $P_u$ ) est convertie en chaleur chaque fois que nous effectuons un mouvement. Et par l'étude de ce frottement, on peut donner des paramètres pour évaluer le bon fonctionnement du couplement, Le critère suivi est celui de limiter la pression superficielle de contact sur le côté du filetage.

On limite aussi le produit ( $\mathbf{P} \cdot \mathbf{Vst}$ ) ( $P$  = pression superficielle de contact et  $Vst$  = vitesse de frottement sur le diamètre moyen du filetage) pour limiter la quantité d'énergie convertie en chaleur.

### - 2.3.3.1) Calcul de la pression superficielle de contact « $\mathbf{P_s}$ » [11] :

On utilise la formule suivante pour calculer la pression superficielle de contact ( $\mathbf{P_s}$ ) :

$$P_s = \frac{F}{A_t} \quad (1)$$

- $\mathbf{F}$  = Force axiale [N]
- $\mathbf{A_t}$  = Surface d'appui totale entre les dents de la vis et les dents de l'écrou sur le plan perpendiculaire à l'axe. [mm<sup>2</sup>]

Dans notre cas, on peut tirer  $A_t$  du logiciel SolidWorks (2020),  $A_t = 180 \text{ mm}^2$

### - 2.3.3.2) Calcul de la vitesse de glissement « $\mathbf{Vst}$ » [11] :

La vitesse de glissement peut être calculée avec une des formules suivantes :

- si nous avons déjà défini le nombre de tours par minute de la vis :

$$V_{st} = \frac{n \times P}{1000 \times \tan \alpha} \quad (2)$$

- $n$  = nombre de tours par minute de la vis (tour/min).
- $P$  = pas du filetage (mm).
- $\alpha$  = angle d'hélice du filetage.

- si nous avons déjà défini à quelle vitesse de transfert l'écrou se doit déplacer :

$$V_{st} = \frac{V_{tr}}{\tan \alpha} \quad (3)$$

- $V_{st}$  = vitesse de glissement sur le diamètre moyen [m/min].
- $V_{tr}$  = vitesse de transfert [m/min].
- $\alpha$  = angle d'inclinaison de l'hélice du filetage.

Nous vous rappelons que le nombre de tours par minute de la vis et la vitesse de transfert sont liées par la formule suivante :

$$n = \frac{1000 \times V_{tr}}{P} \quad (4)$$

- $n$  = nombre de tours par minute.
- $V_{tr}$  = vitesse de transfert [m/min].
- $P$  = pas du filetage [mm].

Pour notre cas, en fixe le nombre de tours par minute de la vis en 1000tr/min Donc en utilise l'équation (2).

Le critère nous permet de tracer le graphe de glissement des écrous de bronze sur les vis en acier.

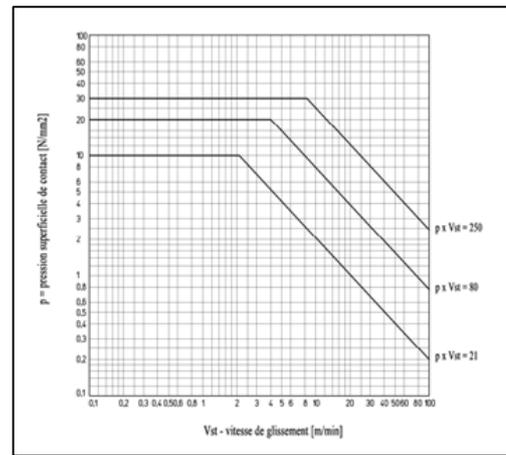


Figure 2.22 : Condition de Glissement du bronze <sup>[11]</sup>

**Zone A** : la zone A est dans la limite de  $P_s \cdot V_{st} = 21$  [ $N/mm^2 \cdot m/min$ ]

Dans cette zone le fonctionnement est dans les meilleures conditions. Le « service continu » est possible parce que la quantité de chaleur produite entre ces limites de  $P_s \cdot V_{st}$  est plutôt limites. La durée de vie de l'écrou est très bonne.

**Zone B** : la zone B est dans la limite de  $P_s \cdot V_{st} = 80$  [ $N/mm^2 \cdot m/min$ ].

Dans cette zone-ci le fonctionnement est dans des conditions plus sévères. Les conditions de glissement sont telles qu'une constante lubrification est nécessaire pour contenir l'usure du bronze à la fin d'avoir des bonnes valeurs de durée de vie de l'écrou. Le fonctionnement « continu » est possible seulement pour périodes limites parce que la quantité de chaleur produite est telle qu'elle provoque un chauffage très marqué de l'écrou, en fonction aussi de la quantité d'huile utilisée, parce qu'au-delà de l'action lubrifiante elle contribue à la dissipation de la chaleur. Nous sommes dans des conditions où la durée de vie de l'écrou est limitée.

**Zone C** : la zone C dans la limite  $P_s \cdot V_{st} = 250$  [ $N/mm^2 \cdot m/min$ ].

En cette zone ci le fonctionnement est dans conditions très dures. Avec ces valeurs de  $P \cdot V_{st}$  travailler en « service continu » n'est pas surement possible. Même en présence d'une bonne lubrification on a un chauffage et une usure de l'écrou assez rapide parce que le glissement entre les surfaces de contact est tels qui provoque une érosion rapide de l'écrou.

- Il faut aussi introduire un coefficient de sécurité pour assurer que le système fonction dans ses limites admissibles, notre critère devient :

$$P_s \cdot V_{st} \cdot f_i \quad (5)$$

Type de charge	$f_i$
Charges constants avec rampes d'acc. /déc. contrôlées	de 1 à 0,5
Charges constants avec démarrages et arrêts à déchirure	de 0,5 à 0,33
Charges très variables et vitesse très variables	de 0,33 à 0,25
Charges à la présence de chocs et vibrations	de 0,25 à 0,17

Tableau 2. 14 : Coefficients de sureté pour différents types de charges <sup>[11]</sup>

Type de charge de notre système est une charge constante avec rampes d'acc/déc contrôlées donc  $0.5 < f_i < 1$ , on prendra  $f_i = 0.8$ .

### - 2.3.3.3) Le rendement :

Le rendement de couple vis/écrou dépend de plusieurs facteurs, Le coefficient de friction entre la vis en acier et l'écrou en bronze, le pas de vis trapézoïdale, l'angle de l'hélice de vis.

$$Rv = \frac{X_E}{X_C} = \frac{\pi D}{P} = \frac{8\pi}{2} = 12.566 \quad (6)$$

- **Rv**: Rapport de vitesse.
- **X<sub>E</sub>**: déplacement de l'effort.
- **X<sub>C</sub>**: déplacement de la charge (équivalent à le pas du vis trapézoïdale).
- **D**: Diamètre de la vis trapézoïdale.
- **P**: le pas de vis

$$\eta = \frac{\tan \alpha}{\tan(\alpha + \beta)} = \frac{\tan(4.549)}{\tan(4.549 + 10.757)} = 0.2537 = 25.37\% \quad (7)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{P}{\pi D}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2}{8\pi}\right) = 4.549^\circ \quad (8)$$

$$\beta = \tan^{-1}(F) = \tan^{-1}(0.23) = 12.952^\circ \quad (9)$$

- $\eta$  : le rendement de couplage vis écrou.
- $\alpha$  : l'angle de l'hélice.
- $\beta$  : l'angle du coefficient de friction.
- **F** : le coefficient de friction, pour notre cas, la vis est en acier et l'écrou est en bronze sans lubrification.

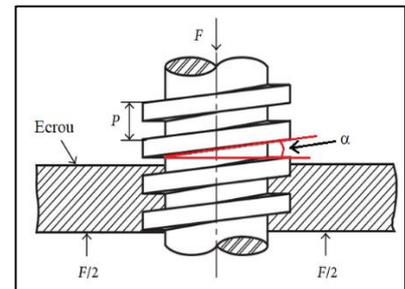


Figure 2. 23 : Diagramme d'une vis trapézoïdale

Coefficient de friction (F) pour vis et écrou				
Matière de vis	Matière de l'écrou			
	Acier	Bronze	Laiton	Fonte
Acier, sec	0.15 -0.25	0.15-0.23	0.15-0.19	0.15-0.25
Acier, lubrifié	0.11-0.17	0.10-0.16	0.10-0.15	0.11-0.17
Bronze	0.08-0.12	0.04-0.06	-	0.06-0.09

Tableau 2. 15: Coefficients de friction (Fr) pour différents types de charges

### - 2.3.4) Choix de moteur :

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.

#### - 2.3.4.1) Le Couple :

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

$$C = \frac{F \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta \cdot 1000} \quad (10)$$

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

#### - 2.3.4.2) La puissance :

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

$$Pt = \frac{C \cdot n}{9550} \quad (11)$$

### - 2.3.5) Calculs des composants selon l'axe Z:

#### - 2.3.5.1) Forces, vitesse et pression exercés sur la tige de l'axe Z :

La charge F suivant Z est purement axiale et comporte en plus du poids des composants ( $F_1$ ), les forces d'inerties dues aux accélérations et aux décélérations ( $F_2$ ) ainsi que les efforts de coupes et de pénétration ( $F_3$ ). On aura donc :

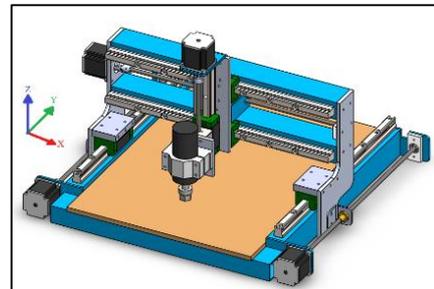


Figure 2. 24: Axes de la machine

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (12)$$

Avec :

$$F_1 = \sum m_i \times g = 3.671 \times 9.81 = 36.01 \text{ N} \quad (13)$$

$$F_2 = \sum m_i \cdot \gamma \quad (14)$$

$\gamma$  : L'accélération, elle est donnée par

$$\gamma = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (15)$$

$\Delta V$  : La variation de la vitesse linéaire, on aura donc :

$$\Delta V = P \cdot n = \frac{2 \times 1000}{60} = 33,33 \text{ mm/s ou } 0.033 \text{ m/s} \quad (16)$$

On prend  $\Delta t = 0.1$  s qui est un temps de réponse assez court, on aura ainsi :

$$\gamma = \frac{33,33}{0.1} = 333,3 \text{ mm/s}^2 \text{ ou } 0,33 \text{ m/s}^2 \quad (17)$$

Donc :

$$F_2 = 3.671 \times 0.6 = 2,20 \text{ N} \quad (18)$$

$F_3$  représente l'effort de pénétration  $F_p$

$$F_3 = F_p \quad (19)$$

$$F_p = \frac{1}{3} F_c \quad (20)$$

$$F_c = Kc \cdot a \cdot f \quad (21)$$

Avec :

- $F_c$  l'effort de coupe.
- $f$  : Avance de l'outil par rotation de la broche en [mm/tr].
- $Kc$  : Coefficient spécifique de coupe dépend de la matière qu'on veut usiner et c'est en [N/mm<sup>2</sup>].

On prend  $Kc = 800 \text{ N/mm}^2$ . (Aluminium)

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

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

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

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

$$F_3 = 48.266 \text{ N} \quad (22)$$

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 (4) nous donne :

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

### - 2.3.5.2) Conclusion:

D'après le graphique, la vis travaille dans la zone A. Les conditions de fonctionnement sont idéales et donc l'usure est faible même en utilisation prolongée.

### - 2.3.5.3) Le couple :

$$C_z = \frac{86.476 \cdot 2}{2 \cdot \pi \cdot 0.25 \cdot 1000} = 0.110 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Cette valeur de couple ne tient pas en considération du rendement des pièces mobiles avec la vis, soit roulements, courroies ou autres. Pendant la projection il faut considérer une hausse de 20 / 30 % par rapport à la valeur technique. Si on utilise des moteurs électriques de faible couple de démarrage, il faut considérer une autre hausse de 50% pour obtenir le couple nominal.

$$C_{nz} = 0.110 \cdot 1.3 \cdot 1.5 = 0.2147 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (23)$$

### - 2.3.5.4) La puissance :

La puissance nécessaire de moteur pas à pas doit être :

$$P_t = \frac{C \cdot n}{9550} = \frac{0.2147 \cdot 1000}{9550} = 0.022 \text{ kW} = 22 \text{ Watt} \quad (24)$$

Nous avons choisi un moteur pas à pas Nema 23 de puissance 50 Watt et couple de 1.2 N.m<sup>[18]</sup>.

### - 2.3.6) Calculs des composants selon l'axe X :

#### - 2.3.6.1) Forces, vitesse et pression exercés sur la tige de l'axe X :

Nous utilisons la même méthode utilisé pour le calcul de l'axe Z, mais cette fois nous l'appliquons pour la tige de l'axe X, avec la condition que la somme des forces sera divisée sur trois car celle-ci est supportée par les deux rails linéaires et la vis trapézoïdale :

$$F = \frac{1}{3} (F_1 + F_2 + F_3) \quad (25)$$

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 :

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

- 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 :

$$P_s \cdot V_{ST} \cdot f = 0.40 \times 25.13 \times 0.8 = 8.04 \text{ Mpa.m/min}$$

### - 2.3.6.2) Conclusion :

D'après le graphique, la vis travail dans la zone A. Elle n'est pas à risque d'usure

Choix de moteur pas à pas :

### - 2.3.6.3) Le Couple :

$$C_X = \frac{F \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta \cdot 1000} = \frac{73.20 \cdot 2}{2 \cdot \pi \cdot 0.25 \cdot 1000} = 0.093 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$C_{nx} = 0.093 \cdot 1.3 \cdot 1.5 = 0.181 \text{ N}\cdot\text{m}$$

### - 2.3.6.4) La Puissance :

$$P_t = \frac{C_{nx} \cdot n}{9550} = \frac{0.181 \cdot 1000}{9550} = 0.019 \text{ kW} = 19 \text{ Watt}$$

Nous avons choisi un moteur pas à pas Nema 23 de puissance 50 Watt et couple de 1.2 N.m. <sup>[18]</sup>.

### - 2.3.7) Calculs des composants selon l'axe Y :

#### - 2.3.7.1) Forces, vitesse et pression exercés sur la tige de l'axe Y :

Même méthode comme pour l'axe X, mais cette fois on divise sur 4, car on a deux tiges trapézoïdales aussi bien que deux rails linéaires.

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4} (F_1 + F_2 + F_3) \quad (26)$$

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

$$\mathbf{F}_1 = \Sigma m_i \times g = 17.82 \times 9.81 = 174.81 \text{ N}$$

La masse de  $F_2$  change une autre fois aussi donc la force  $F_2$  change aussi :

$$\mathbf{F}_2 = \Sigma m_i \times \gamma = 17.82 \times 0.6 = 10.692 \text{ N}$$

$F_3$  dans ce cas représente l'effort de coupe au lieu de l'effort de pénétration une autre fois donc aucun changement:

$$\mathbf{F}_3 = F_c = a \cdot f = 800 \times 1 \times 0.181 = 144.8 \text{ N}$$

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

Donc, la force totale  $F$  égale à :

$$\mathbf{P}_s = \frac{F}{A_t} = \frac{82.57}{180} = 0.46 \text{ MPa}$$

- Pression superficielle de contact  $P$  :
- La vitesse de glissement  $V_{ST}$  :

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

Le produit (4) nous donne :

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

#### - 2.3.7.2) Conclusion:

D'après le graphique, la vis travaille dans la zone A encore. Elle n'est pas à risque d'usure.

- 2.3.7.3) Le Couple :

$$C_y = \frac{F \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta \cdot 1000} = \frac{82.57 \cdot 2}{2 \cdot \pi \cdot 0.25 \cdot 1000} = 0.105 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$C_{ny} = 0.105 \cdot 1.3 \cdot 1.5 = 0.205 \text{ N}\cdot\text{m}$$

- 2.3.7.4) La Puissance :

$$P_t = \frac{C \cdot n}{9550} = \frac{0.205 \cdot 1000}{9550} = 0.021 \text{ kW} = 21 \text{ Watt}$$

Nous avons choisi un moteur pas à pas Nema 23 de puissance 50 Watt. et couple de 1.2 N.m. [18].

- 2.3.8) Calculs du système de guide à rail linéaire :

- 2.3.8.1) Le choix du chariot de rail linéaire :

Pour déterminer la durée de vie du chariot de rail linéaire, on doit tout d'abord déterminer la charge dynamique, on peut utiliser la formule suivante :

$$L = \left( \frac{F_h \cdot F_t \cdot C}{P_c \cdot F_w} \right)^3 \cdot 50 \tag{27}$$

- **C** : Charge dynamique.
- **F<sub>h</sub>** : Facteur de dureté.
- **F<sub>t</sub>** : Facteur de température.
- **F<sub>w</sub>** : Facteur de charge.
- **P<sub>c</sub>** : Charge appliqué.
- **L** : La durée de vie.

Nous avons choisi l'axe Y car c'est le plus utilisé, soumis à une plus grand force et de déplacement le plus long. On a utilisé le model **HGH25CA** dans notre machine, avec une charge dynamique de 3490 N [12].

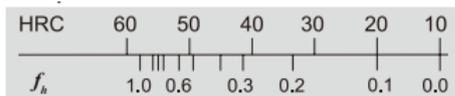
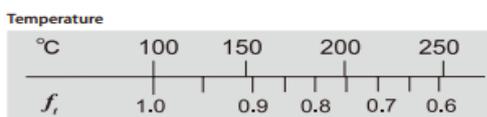


Figure 2. 25: Diagramme de dureté [12]

D'après le diagramme et le catalogue,  $F_h = 1$ .



D'après le diagramme et notre condition de travail,  $F_t = 1$ .

Figure 2. 26: Diagramme de température [12]

Condition de charge	Vitesse de service	F <sub>w</sub>
Pas de choc ou vibration	V ≤ 15 m/min	1 – 1.2
Petite choc	15m/min < V ≤ 60 m/min	1.2 – 1.5
Charge normal	60/min < V ≤ 120 m/min	1.5 – 2.0
Avec choc et vibration	V > 120 m/min	2.0 – 3.5

Tableau 2. 16: Condition de charge et facteur de charge F<sub>w</sub> <sup>[12]</sup>

Pour notre cas, on prend F<sub>w</sub> = 2.0

Donc:

$$L = \left( \frac{3490}{82.57 \cdot 2} \right)^3 \cdot 50 = 471\,942 \text{ Km}$$

### - 2.3.8.2) Calcul de vie de service :

$$L_h = \frac{L \cdot 10^3}{V_e \cdot 60} \quad (28)$$

- V<sub>e</sub> : Vitesse (m/min).
- L : Vie nominal (Km).
- L<sub>h</sub> : Vie de service (hr).

$$L_h = \frac{471\,942 \cdot 10^3}{120 \cdot 60} = 65\,547.5 \text{ hr}$$

### - 2.3.9) 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 :

$$C = \frac{f_L \cdot f_Z \cdot P}{f_t \cdot f_n \cdot f_H} \quad (29)$$

$$L_h = \left( \frac{C}{P} \right)^k \cdot \frac{10^6}{60 \cdot N} \quad (30)$$

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  $L_h \text{ nécessaire} = 50000 \text{ h}$ .

$$f_L = \sqrt[3]{\frac{L_h \text{ nécessaire}}{500}} = 4.64 \quad (31)$$

-  $f_n$  : Coefficient de nombre de tours.

$$f_n = \sqrt[3]{\frac{100}{3 \cdot n}} = 0.32 \quad (32)$$

### - 2.3.9.1) Calculs sur les roulements de l'axe Z :

Sachant que  $P = 86.476 \text{ N}$ , On aura donc :  $C = 1253 \text{ N}$ .

On choisit donc le roulement à billes 608zz avec  $C_{\text{dyn}} = 3,39 \text{ KN}^{[13]}$ .

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

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

### - 2.3.9.2) Calculs sur les roulements de l'axe Y :

Sachant que  $P = F/4 = 82.57 \text{ N}$ .

On aura donc :  $C = 1197.2 \text{ N}$ .

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

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

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

**Remarque :** On a divisé la charge supportée par le roulement par quatre, car elle est répartie sur deux rails de guidage et deux vis trapézoïdales.

### - 2.3.9.3) Calculs sur les roulements de l'axe X :

Sachant que  $P = F/3 = 73.20 \text{ N}$ .

On aura donc :  $C = 1061.4 \text{ N}$ .

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

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

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

## 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.

## - 2.4) Calculs opérationnels:

### - 2.4.1) La Trajectoire :

Pour la génération de la trajectoire de l'outil de la machine pour la fabrication d'une pièce, nous pouvons utiliser différents types de logiciels, mais pour notre cas, nous utilisons SolidWorks CAM 2020 pour sa commodité, sa simplicité et son intégration dans le reste de notre flux de travail.

### - 2.4.2) Les opérations :

Nous pouvons utiliser une multitude d'opérations, mais dans l'exemple donné, nous utilisons les opérations de :

- Pochage.
- Gravure.
- Perçage.
- Découpage de formes.

Tout d'abord, nous devons définir nos paramètres de base :

### - 2.4.3) Calcul de la trajectoire avec le logiciel:

Dans cette fenêtre, nous configurons les données suivantes de notre MOCN : la puissance des moteurs, la vitesse d'avance, la surface de travail et la vitesse de la broche. Nous pouvons même modifier la base de données d'outils à notre guise et à ce qui est disponible pour nous.

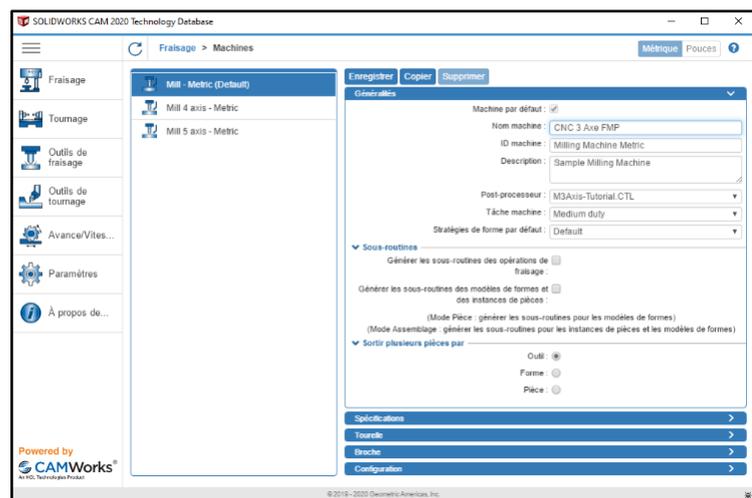


Figure 2. 27 : configuration de la machine

Nous définissons le point d'origine d'usinage et nous alignons les axes de mouvements selon l'orientation des axes de la machine, et ensuite nous dimensionnons notre pièce brute.

Pour cette pièce, les dimensions de stock sont :

X : 268 mm

Y : 269 mm

Z : 15 mm

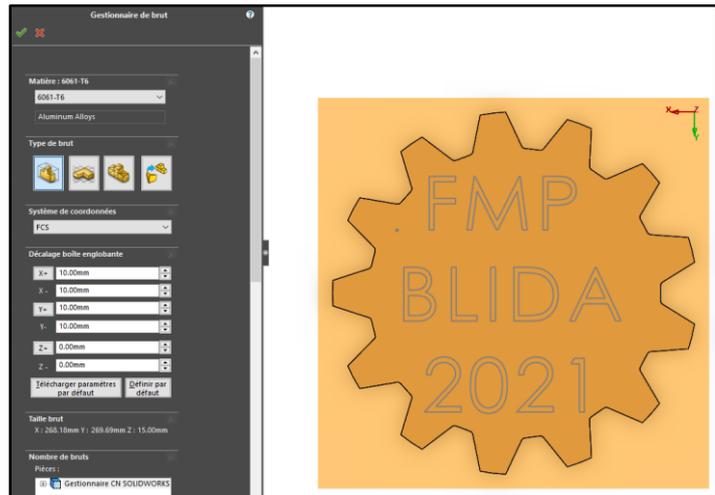


Figure 2. 28 : Définitions de l'origine et les dimensions de la pièce brute

Ensuite, nous choisissons la face principale d'usinage de puis l'outil de **Configuration du fraisage**, nous extrayons les formes usinables ou les sélectionnons manuellement depuis la fonction 2,5 axe, et nous définissons les paramètres d'usinage comme le plan rapide, la trajectoire de l'outil.

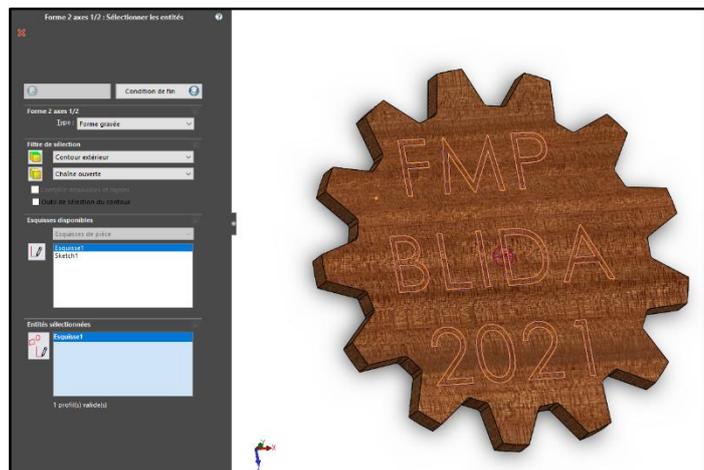


Figure 2. 29 : Choix de la face d'usinage et les formes usinables

Et à la fin, nous faisons la simulation de trajectoire, tout en tout assurons que l'outil n'entre pas en collision avec la pièce à travailler et nous extrayons le code G.

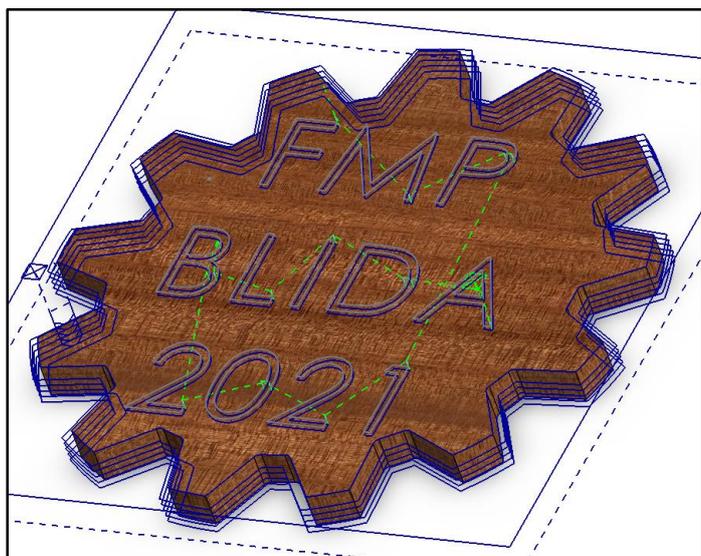


Figure 2. 30 : La trajectoire de l'outil

## **CHAPITRE III:**

### **Conception et réalisation**

### - 3.1) Composant réalisé:

#### - 3.1.1) Châssis :

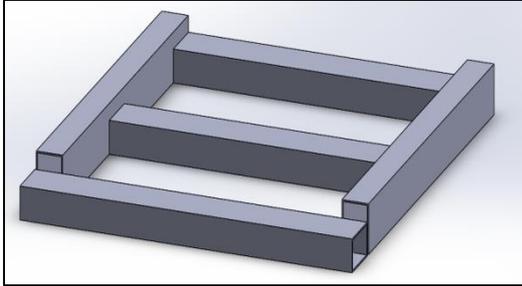


Figure 3. 1 : Rendu 3D du châssis

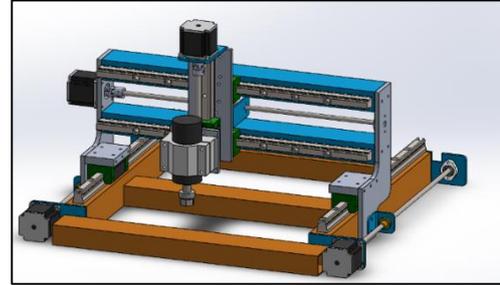


Figure 3. 2 : Emplacement du châssis dans la machine

Le châssis forme la base de notre machine, et sa construction doit être solide et rigide pour qu'il puisse supporter les forces de coupe, torsion et flexion de la machine.

Nous avons utilisé des tubes métalliques carrés d'acier de taille 60mm x 40mm x 2mm soudés ensemble, ce qui permet d'assurer la rigidité de la base.



Figure 3. 3 : le châssis

#### - 3.1.2) Support moteur et roulement :

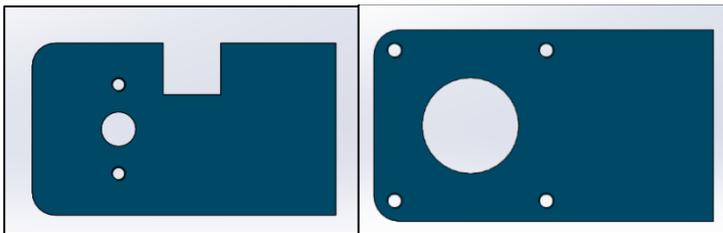


Figure 3. 4 : Support moteur et roulement

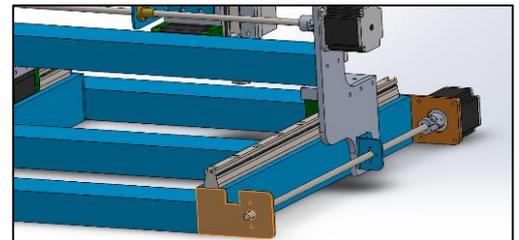


Figure 3. 5 : Emplacement de support dans la machine

Le support moteur et roulement servent comme structures de montage pour le moteur et le roulement, ils sont fabriqués à partir d'une tôle de 4 mm d'épaisseur pour assurer la stabilité et la rigidité et ils sont soudés au châssis à l'aide d'un soudage à la baguette.

### - 3.1.3) Supports d'écrou trapézoïdal :

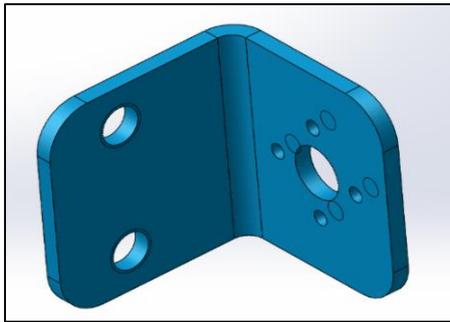


Figure 3. 6 : Rendu 3D de Supports d'écrou trapézoïdale

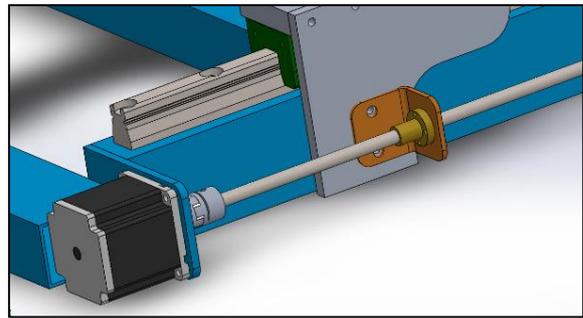


Figure 3. 7 : Emplacement de support d'écrou trapézoïdale

Nous avons utilisé des cornières de 40 mm en acier pour les supports d'écrou trapézoïdale, ils fournissent une base solide pour que la vis trapézoïdale, l'écrou et le portique interagissent les uns avec les autres et transfèrent la force de rotation fournie par les moteurs en un mouvement linéaire.



Figure 3. 8 : Support d'écrou trapézoïdal

Ils sont montés au portique avec une fixation par vis.

### - 3.1.4) Support de l'axe X :

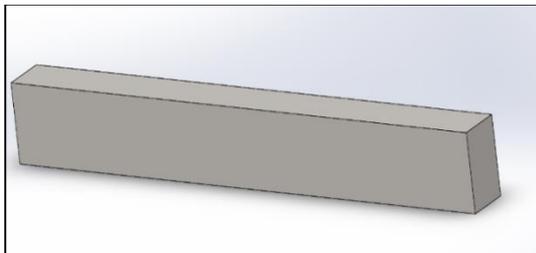


Figure 3. 9 : Rendu 3D de support de l'axe X

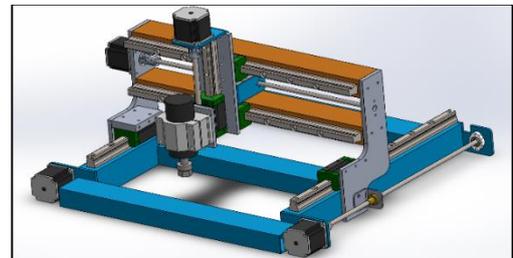


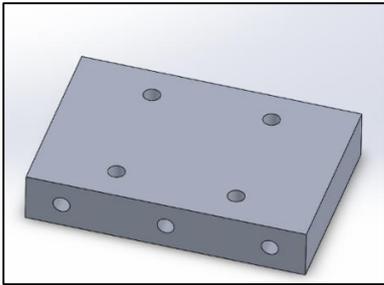
Figure 3. 10 : Emplacement de support de l'axe X

Celui-ci a été réalisé à partir des mêmes tubes rectangulaires en acier que le cadre, fermé aux deux extrémités pour permettre de le fixer aux pièces de support par vis, il sert de surface de montage pour les rails linéaires de l'axe X avec des vis aussi et ajoute plus de rigidité à la machine.

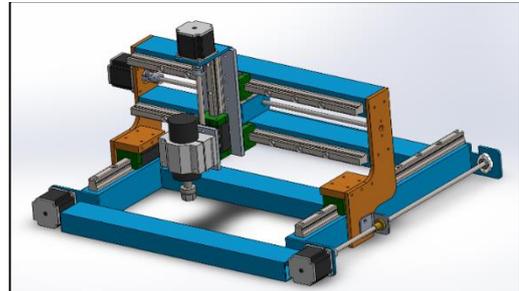


Figure 3. 11 : Support de l'axe X

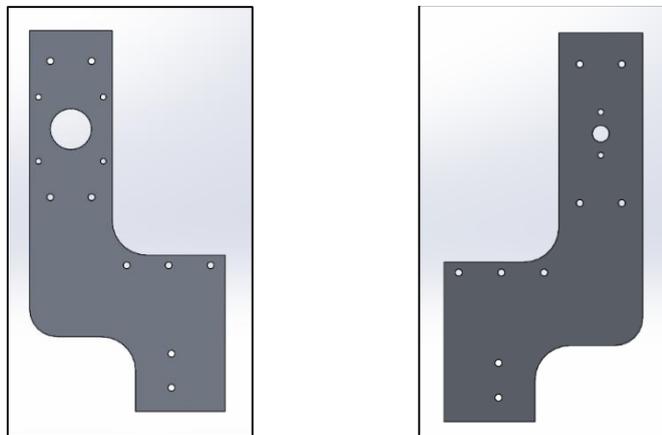
### - 3.1.5) Support du portique et plaque de montage de glissière :



**Figure 3. 12 :** Rendu 3D de plaque de montage de glissière



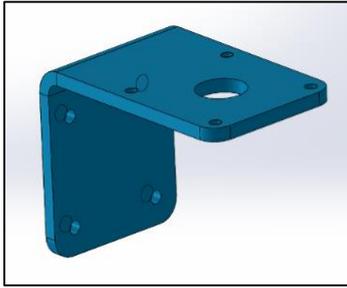
**Figure 3. 13 :** Support du portique et plaque de montage de glissière



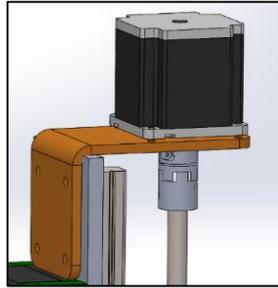
**Figure 3. 14 :** Rendu 3D de Support du portique

Les supports de portique et la plaque de montage de patin sont tous usinés avec une machine CNC en aluminium pour conserver du poids sur la machine, Les supports de portique sont sans doute les plus importantes pieces fabriquées, car elle définit les dimensions finales de la machine, donc ce model a été choisi spécifiquement pour maximiser le rapport entre la surface de travail et la taille physique de la machine, en gardant la surface de travail relativement grande par rapport aux dimensions de la machine et par rapport à d'autres machines de taille similaire dans le marché, tout en respectant les limites auxquelles nous nous sommes confrontés lorsque l'achat de certaines pièces comme la vis trapézoïdale.

### - 3.1.6) Support de moteur de l'axe Z :



**Figure 3. 15 :** Rendu 3D de support de moteur de l'axe Z



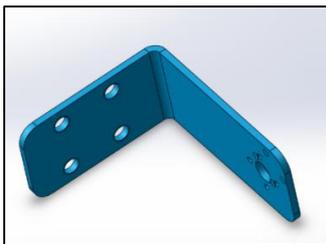
**Figure 3. 16 :** Emplacement de support de moteur de l'axe Z



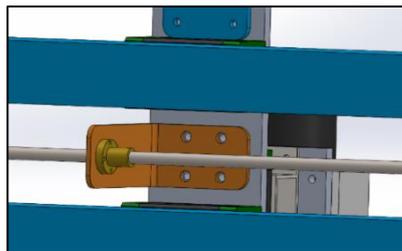
**Figure 3. 17 :** Support de moteur de l'axe Z

Cette pièce de support est construite à partir d'une pièce de tôle de 4 mm d'épaisseur pliée en forme puis percée selon les trous de montage du moteur suivant la norme Nema 23.

### - 3.1.7) Support de vis trapézoïdale de l'axe X :



**Figure 3. 18 :** Rendu 3D de support de vis trapézoïdale de l'axe X



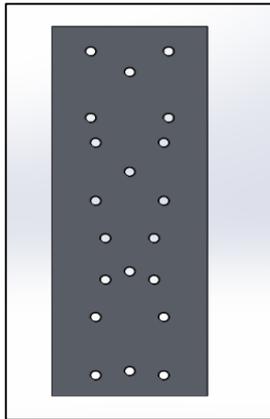
**Figure 3. 19 :** Emplacement de support de vis trapézoïdale de l'axe X



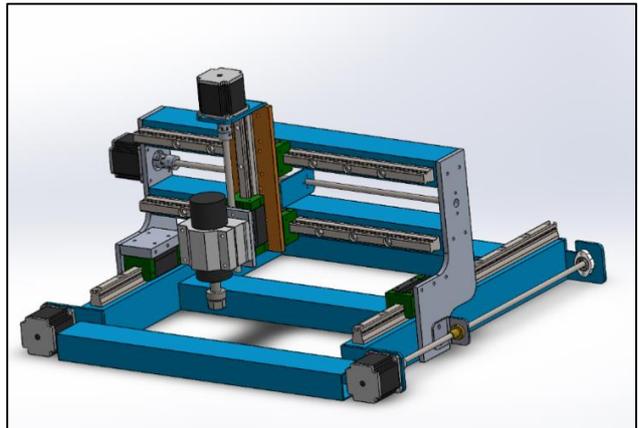
**Figure 3. 20 :** Support de vis trapézoïdale de l'axe X

Cette pièce a été fabriquée de la même manière que le support du moteur, une tôle de 4 mm d'épaisseur pliée en forme et percée, elle sert de moyen principal avec lequel le moteur peut déplacer l'assemblage de la broche.

### - 3.1.8) Plaque de support de l'axe Z :

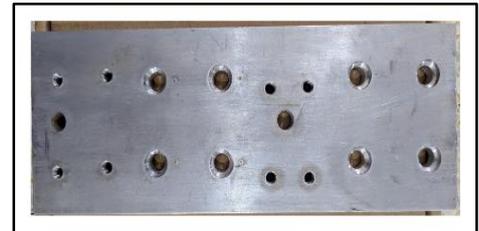


**Figure 3. 21 :** Rendu 3D de plaque de support de l'axe Z



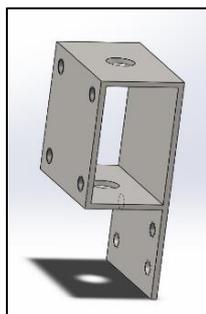
**Figure 3. 22 :** Emplacement Plaque de support de l'axe Z

Sans doute l'une des pièces les plus importantes, est celle qui relie l'axe Z et l'assemblage de la broche à l'axe X, et elle sert comme la surface de montage pour une multitude de composants, elle est fabriquée à partir d'une plaque d'aluminium de 10 mm d'épaisseur fabriquée avec une machine CNC avec le reste des pièces en aluminium.

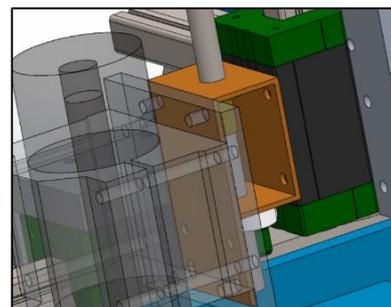


**Figure 3. 23 :** Plaque de support de l'axe Z

### - 3.1.9) Support de vis trapézoïdale d'axe Z :



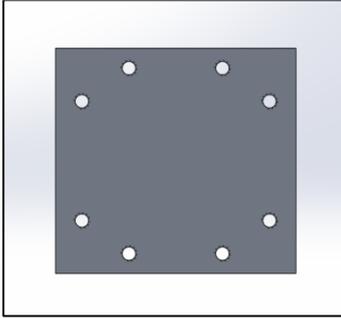
**Figure 3. 24 :** Rendu 3D de support de vis trapézoïdale d'axe Z



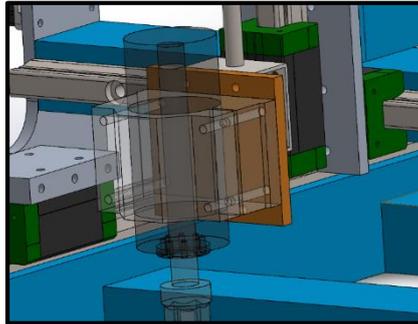
**Figure 3. 25 :** Emplacement de support de vis trapézoïdale d'axe Z

Cette pièce est faite sur mesure pour s'adapter à ce modèle de machine, elle sert de support principal pour la vis trapézoïdale, elle est fabriquée à partir d'un morceau de tube carré en acier coupé en forme avec une plaque de montage pour l'assemblage de la broche.

### - 3.1.10) Plaque support de broche :



**Figure 3. 26 :** Rendu 3D de plaque support de broche



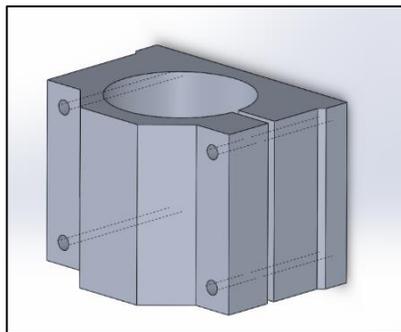
**Figure 3. 27 :** Emplacement de plaque support de broche



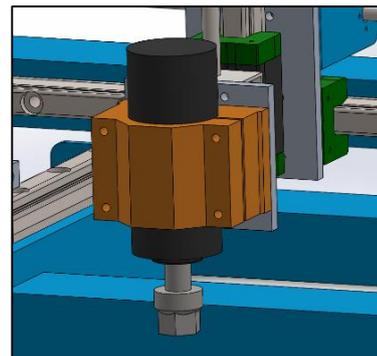
**Figure 3. 28 :** La plaque support de broche

La plaque support de broche sert comme une surface de montage pour la porte outils et la broche, elle est usinée d'une plaque d'aluminium d'épaisseur de 10 mm .

### - 3.1.11) Le porte outil :



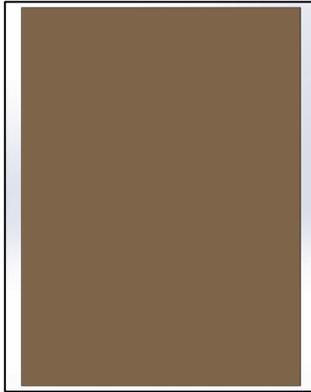
**Figure 3. 29 :** Rendu 3D de porte outil



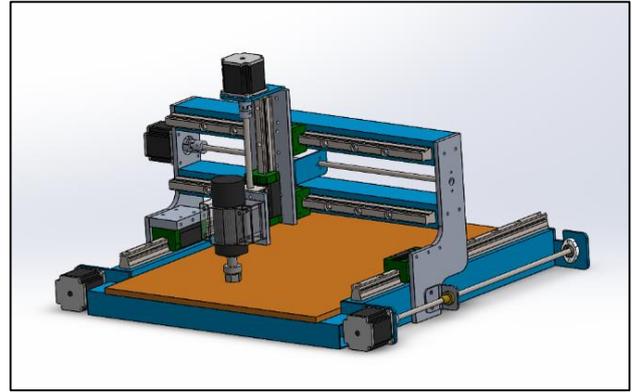
**Figure 3. 30 :** Emplacement du porte outil

Le porte-outil peut être une pièce préfabriquée en aluminium que nous pouvons acheter avec la broche ou nous pouvons le fabriquer à partir de bois, en fait, en le fabriquant à partir de bois, il est léger et bon marché, ce qui aide à réduire le poids sur l'axe Z et le coût global , mais il aura l'air moins professionnel que son homologue acheté.

### - 3.1.12) La table :



**Figure 3. 31 :** Rendu 3D de la table ou surface de travail



**Figure 3. 32 :** Emplacement de la table

La table de découpe est juste un morceau de MDF de 15 mm d'épaisseur et considérée comme notre surface de travail, sa seule fonction est de servir comme une surface plane sur laquelle nous montons les pièces souhaitées et de absorber tout accident qui pourrait survenir lors de l'utilisation de la machine, elle est conçue pour être jetable et remplaçable.

### - 3.2) Choix de matériaux:

Les matériaux de construction ont été choisis en fonction de leur prix abordable, de leur poids et de leurs propriétés mécaniques.

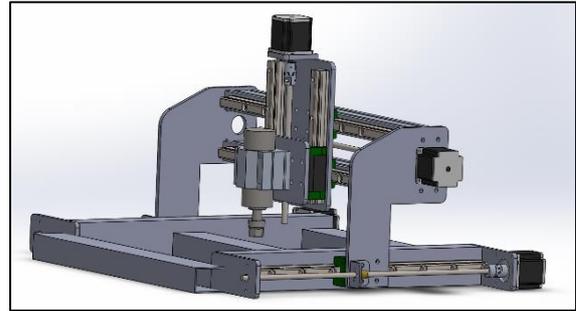
Pour le châssis, les supports des vis trapézoïdales, roulements, moteur pas à pas et le support de l'axe X, nous avons choisi d'utiliser l'acier de type 304, relativement peu coûteux et donne la structure de la machine à savoir sa bonne rigidité.

Pour tous les autres composants, nous avons utilisé l'alliage aluminium 3003 pour économiser du poids et pour ses bonnes propriétés mécanique.

### - 3.3) Les prototypes:

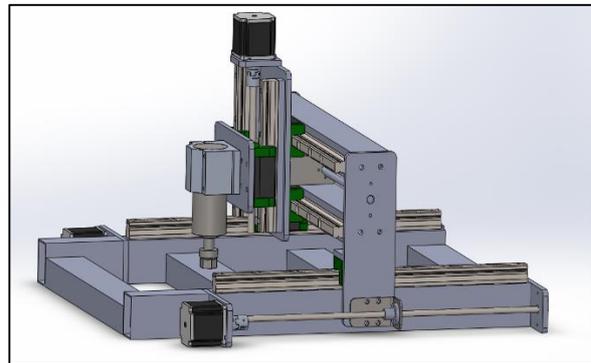
Au cours de la conception de cette machine, nous avons passé par plusieurs solutions, prototypes Model et formes que nous pouvons utiliser, et chacun a ses avantages et ses inconvénients, parmi ces prototypes, les meilleurs candidats sont :

Le modèle **figure 3.33** qu'il a de bonne fonction, mais en raison de la forme des pièces de support du portique et des rails linéaires qui sont sur le côté, cela a rendu la machine trop longue le long de l'axe X, et nous n'avons pas pu trouver une vis trapézoïdale de cette longueur qui était abordable.



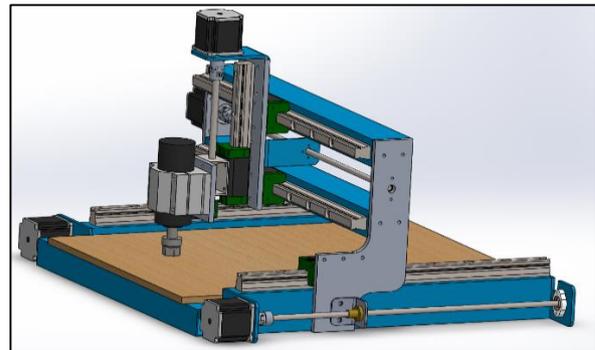
**Figure 3. 33** : Première prototype de la conception de la machine

Avec le modèle **Figure 3.34**, nous avons changé la forme des pièces de support du portique pour permettre plus de liberté dans l'axe X, et placé les rails linéaires sur le dessus du cadre, mais cela a provoqué le déplacement du centre de gravité, le plaçant trop en avant et le déséquilibre de la machine, ainsi la machine a augmenté sa taille le long de la direction Y.



**Figure 3. 34** : Deuxième prototype de la conception de la machine

Et quant à ce modèle, il a été optimisé pour être peu encombrant en changeant la forme des structures de support du portique tout en gardant le centre de gravité directement au-dessus des blocs de guidage de rail linéaire et de la lumière en réduisant le nombre de rails linéaires et de planeurs le long du Z axe. Tout en respectant les spécifications souhaitées de notre machine et dans les limites de notre budget et de la disponibilité des pièces lorsqu'il s'agit de la vis trapézoïdale. Nous avons donc choisi cette conception pour la machine.



**Figure 3. 35** : Troisième et dernière prototype de la conception de la machine



**Figure 3. 36** : Les composants de la machine

# **CHAPIRE IV:**

## **Programmation**

#### **- 4.1) Introduction:**

La programmation d'une M.O.C.N joue un grand rôle dans le résultat final du produit est nécessaire pour utiliser une M.O.C.N

#### **- 4.2) Definition <sup>[14]</sup>:**

La programmation est un travail préparatoire, qui consiste à transposer le programme d'usinage d'une pièce sous forme de texte alphanumérique en un ensemble ordonné d'instructions que la CN comprend et exécute pour effectuer leur usinage. Ce travail peut être effectué manuellement ou à l'aide d'un ordinateur utilisant un langage de programmation de haut niveau.

En effet, toutes les opérations d'usinage d'un programme nécessitent un certain nombre de fonctions identiques. Ces instructions sont appelées G-Code.

G-code a été créé pour la première fois dans les années 1960 par l'Electronics Industry Association (EIA), documentée sous le nom de RS-274D, nous l'appelons Code-G car la majorité du code commence avec la lettre G.

Alors que le code G est censé être une norme universelle, chaque fabricant de machine a sa propre saveur et cela dépend des capacités de la machine.

#### **- 4.3) Blocs G-Code <sup>[14]</sup>:**

Prenons, par exemple, cette ligne de code:

```
G01 X1 Y1 F20 T01 M03 S500
```

Dans cette seule ligne, nous donnons à la machine une série d'instructions:

- G01 - Effectuer un mouvement d'avance linéaire.
- X1 / Y1 - Déplacer vers ces coordonnées X et Y.
- F20 - Déplacement à une vitesse d'avance de 20.
- T01 - Utiliser l'outil 1 pour faire le travail.
- M03 - Allumer la broche.
- S500 - Régler une vitesse de broche de 500.

Plusieurs lignes de code G comme celles-ci se combinent pour former un programme CNC complet.

#### - 4.4) Programme G-Code <sup>[14]</sup>:

Le but de chaque programme G-code est de produire des pièces de la manière la plus sûre et la plus efficace possible. Pour ce faire, vous trouverez généralement des blocs de code G disposés dans un ordre particulier comme celui-ci:

- 1- Démarrez le programme CNC.
- 2- Chargez l'outil requis.
- 3- Allumez la broche.
- 4- Ouvrez le liquide de refroidissement.
- 5- Déplacez-vous vers une position au-dessus d'une pièce.
- 6- Démarrez le processus d'usinage.
- 7- Arrêtez le liquide de refroidissement.
- 8- Éteignez la broche.
- 9- Éloignez-vous de la pièce vers un endroit sûr.
- 10- Terminez le programme CNC.

#### - 4.5) Modaux et codes d'adresse <sup>[14]</sup>:

G-code comprend également une liste complète des codes d'adresse. Nous pouvons le considérer comme le dictionnaire du code G qui définit des comportements particuliers. Les codes d'adresse commencent par la désignation de la lettre, comme G, puis par un ensemble de chiffres. Par exemple ; X2 définit un code d'adresse en coordonnées X, où 2 est la valeur sur l'axe X vers laquelle déplacer la machine.

La liste complète des codes d'adresse comprend:

Code	Définition
<b>A</b>	Rotation autour de l'axe X
<b>B</b>	Rotation autour de l'axe Y
<b>C</b>	Rotation autour de l'axe Z
<b>D</b>	Compensation de diamètre de l'outil (CDC)
<b>F</b>	L'avance
<b>G</b>	Code-G ( Code préparatoire)
<b>H</b>	Décalage de la longueur de l'outil
<b>I</b>	Arc center X-vector, également utilisé dans les cycles de forage
<b>J</b>	Arc center Y-vector, également utilisé dans les cycles de forage
<b>K</b>	Arc center Z-vector, également utilisé dans les cycles de forage
<b>M</b>	Code-M (Code divers)
<b>N</b>	Nombre de bloc
<b>O</b>	Nombre de programmes

<b>P</b>	Temps de séjour
<b>Q</b>	Utilisé dans les cycles de forage
<b>R</b>	Rayon d'arc, également utilisé dans les cycles de forage
<b>S</b>	Vitesse de broche dans tr/m
<b>T</b>	Nombre d'outils
<b>X</b>	Coordonnée X
<b>Y</b>	Coordonnée Y
<b>Z</b>	Coordonnée Z

**Tableau 4. 1** : Les codes et leur définition <sup>[14]</sup>

Plusieurs codes de caractères spéciaux peuvent être ajoutés à un programme G-code. Ceux-ci sont généralement utilisés pour démarrer un programme, commenter du texte ou ignorer des caractères et incluent:

- % Commence ou termine un programme CNC.
- () Définit un commentaire écrit par un opérateur CNC; occasionnellement, ceux-ci doivent être en majuscules.
- / Ignore tous les caractères qui viennent après la barre oblique.
- ; Détermine quand un bloc de code se termine, non affiché dans un éditeur de texte.

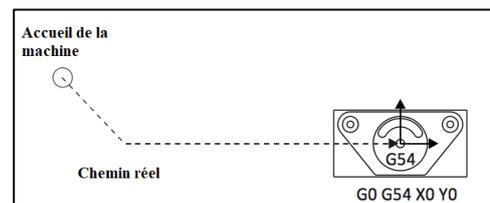
#### - 4.6) Explication des codes G et des codes M <sup>[14]</sup>:

Les codes G & M constitueront l'essentiel du programme CNC. Les codes commençant par G préparent la machine à effectuer un type de mouvement spécifique. Les codes G les plus courants que vous rencontrerez plusieurs fois dans chaque programme CNC incluent:

##### - 4.6.1) Code G <sup>[14]</sup>:

###### - 4.6.1.1) G0 - Déplacement rapide <sup>[14]</sup>:

Ce code indique à une machine de se déplacer le plus rapidement possible vers une position de coordonnées spécifiées.



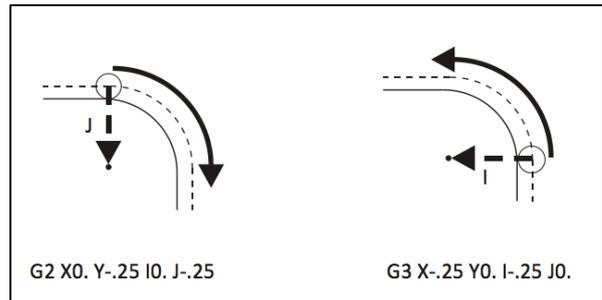
**Figure 4. 1** : Représentation de déplacement rapide <sup>[14]</sup>

###### - 4.6.1.2) G1 - Déplacement linéaire <sup>[14]</sup>:

Ce code indique à une machine de se déplacer en ligne droite vers une position de coordonnées avec une vitesse d'avance définie. Par exemple, G1 X1 Y1 F32 déplacera la machine vers les coordonnées X1, Y1, à une vitesse d'avance de 32.

**- 4.6.1.3) G2, G3 - Arc dans le sens des aiguilles d'une montre, arc dans le sens inverse des aiguilles d'une montre [14]:**

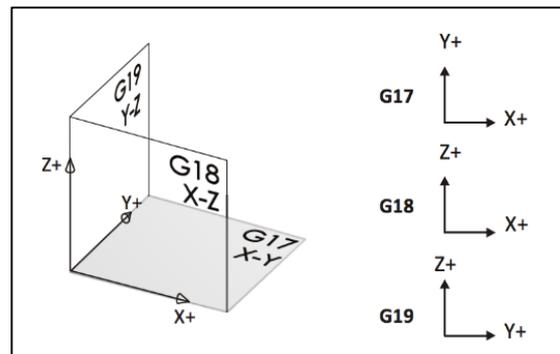
Ces codes indiquent à la machine de se déplacer dans un arc vers une destination de coordonnées. Deux coordonnées supplémentaires, I et J, définissent l'emplacement central de l'arc comme indiqué à coté.



**Figure 4. 2 :** Représentation d'un déplacement dans un arc [14]

**- 4.6.1.4) G17, G18, G19 - Désignations des avions [14]:**

Ces codes définissent le plan sur lequel un arc sera usiné. Par défaut, votre machine CNC utilisera G17, qui est le plan XY. Les deux autres plans sont illustrés dans l'image à coté.



**Figure 4. 3 :** Représentation des coordonnées et leur code G [14]

**- 4.6.2) Codes M [14]:**

Les codes M sont des codes machine qui peuvent différer entre les machines CNC. Ces codes contrôlent les fonctions de votre machine CNC comme les directions du liquide de refroidissement et de la broche. Certains des codes M les plus courants incluent:

Code	Définition
<b>M0</b>	Arrêt de programme
<b>M1</b>	Arrêt facultatif
<b>M2</b>	Fin de programme
<b>M3</b>	Broche dans le sens des aiguilles d'une montre
<b>M4</b>	Broche dans le sens antihoraire
<b>M5</b>	Arrêt de la broche
<b>M6</b>	Changer d'outil
<b>M8</b>	Liquide de refroidissement activé
<b>M9</b>	Liquide de refroidissement désactivé
<b>M30</b>	En programme et appuyer sur cycle start pour l'exécuter à nouveau

**Tableau 4. 2 :** Liste des codes M et leurs définitions [14]

#### - 4.7) La commande numérique <sup>[15]</sup>:

Un pilote de moteur pas à pas est un dispositif électronique utilisé pour entraîner le moteur pas à pas. En soi, il ne fait généralement rien et doit être utilisé avec un contrôleur tel que **PoKeys57CNC**.

Il existe de nombreux types de pilotes de moteurs pas à pas, mais en général, ils font tous la même chose: déplacer des moteurs pas à pas.

##### - 4.7.1) Le pilote de moteur pas à pas <sup>[15]</sup>:

Le contrôleur est un appareil électrique avec une capacité de sortie faible et ne peut pas assurer les tensions et les courants requis pour utiliser les moteurs pas à pas, donc nous devons utiliser des pilotes qui reçoivent les commandes depuis quelque FET et les transforment à des tensions et courants suffisants pour mener les moteurs pas à pas.

##### - 4.7.2) Le fonctionnement d'un pilote de moteur pas à pas <sup>[15]</sup>:

La tâche de base du pilote est de générer un signal approprié à partir des données d'entrée pour tourner le moteur et changer la direction en inversant le sens du courant dans les bobines.

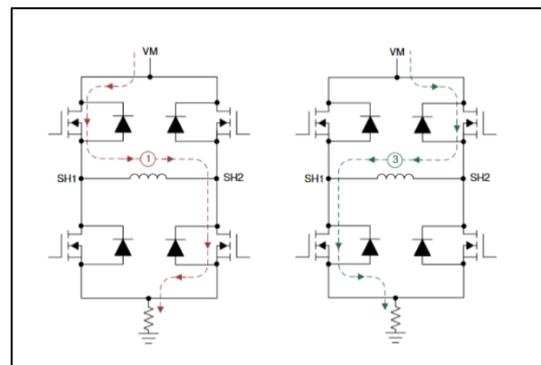


Figure 4. 4 : Entraînement des bobines dans les deux sens de rotation <sup>[15]</sup>

##### - 4.7.3) Le choix des pilotes de moteur pas à pas <sup>[15]</sup>:

Pour le choix des pilotes de moteur pas à pas, puisque nous utilisons des moteurs pas à pas NEMA 23, nous devons choisir des pilotes où la puissance du pilote est appropriée avec les moteurs NEMA 23 avec des capacités de micro-pas, donc nous utilisons les pilotes.

##### - 4.7.4) Micro-pas <sup>[15]</sup>:

Les moteurs pas à pas se déplacent par pas qui est généralement de 1,8 °, soit 200 pas par tour. Nous pouvons augmenter le nombre de pas dans un moteur en introduisant des micro-pas, nous divisons le signal de contrôle par 1/2, 1/4, 1/8 et 1/16, mais il ne faut pas trop augmenter le micro pas car cela réduirait le couple du moteur et il ne pourra plus tourner, nous ne dépassons généralement pas 1/8.

L'image suivante montre comment la sortie change lors de la sélection de différentes valeurs de micro-pas. Nous pouvons voir que la sortie ressemble de plus en plus à une onde sinusoïdale.

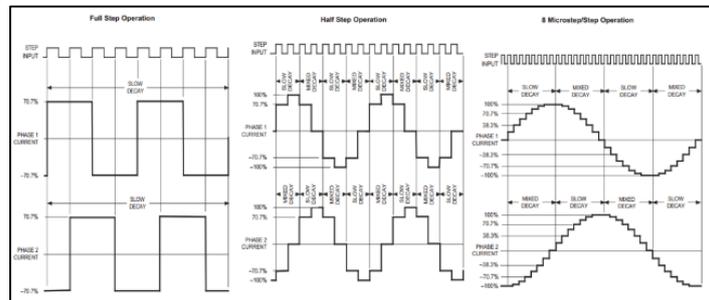


Figure 4.5 : La résolution du signal de chaque type de pas [15]

#### - 4.7.5) Logiciel de pilotage :

Pour le pilotage de la machine, nous utilisons le logiciel appelé NcStudio, Ses avantages résident dans le nombre de 32 bits et la coopération de plusieurs tâches. Comparé à d'autres systèmes, il devient exceptionnel avec la précision à grande vitesse, la coopération de tâches multiples et l'interconnexion du réseau.

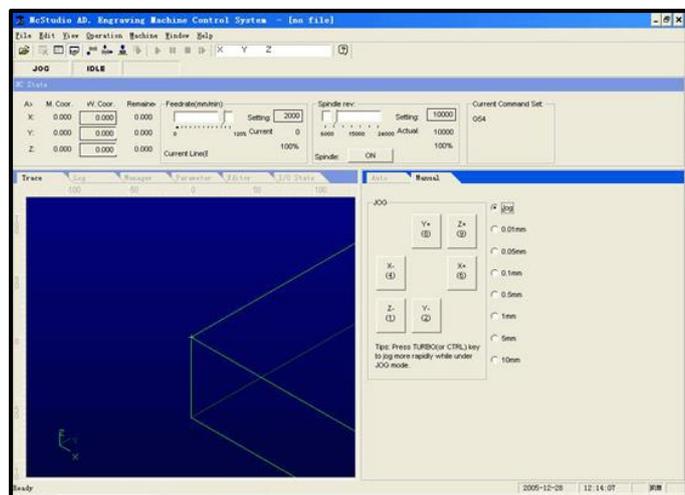


Figure 4.6 : Interface d'utilisateur de NcStudio

#### - 4.7.6) Câblage des moteurs pas à pas [15]:

Il y a plusieurs types de moteur pas à pas avec un nombre différent de fils de connexion Les plus courants sont les moteurs à deux enroulements de bobines, 4 fils. Dans l'image ci-dessous, nous avons les différentes options de câblage des moteurs à 4, 6 et 8 fils.

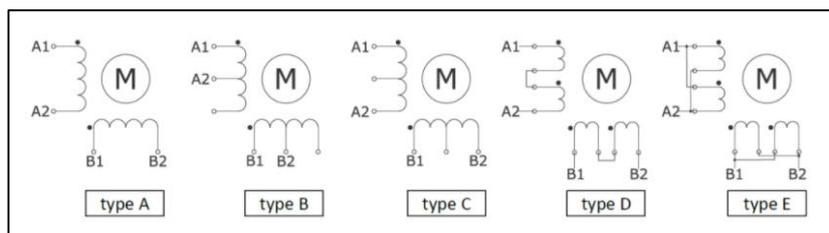


Figure 4.7 : Diagramme de câblage des moteurs pas à pas

# **Conclusion générale**

## **1. Conclusions:**

Dans ce projet, nous avons abordé les calculs requis pour la conception et la réalisation d'une machine CNC à 3 axes. Nous avons commencé par mettre en place un cahier de charge avec les objectifs et les jalons que nous voulions atteindre avec ce projet. L'objectif est une planification et une exécution des étapes nécessaires pour atteindre le produit fini avec le moins de problèmes possible.

L'importance d'une bonne conception de produit, de bonnes pratiques de conception ainsi que l'importance des logiciels de CAO comme SolidWorks, permet d'éviter de gaspiller des matériaux et ne pas dépasser le budget fixé pour le projet.

De même, nous avons vu l'importance et l'intérêt des tolérances de fabrication et des mesures nécessaires et le travail acharné qu'il faut pour rester dans ces tolérances.

Dans l'ensemble, ce projet nous a aidés à appliquer nos connaissances acquises durant notre cursus universitaire et de passer d'un travail purement théorique à une approche plus pratique. Ce travail nous a ouvert les yeux sur de nouvelles avenues et projets futurs.

La réalisation du prototype de fraiseuse CNC à 3 axes, après étude, a donné entière satisfaction.

## **2. Perspectives:**

En perspectives :

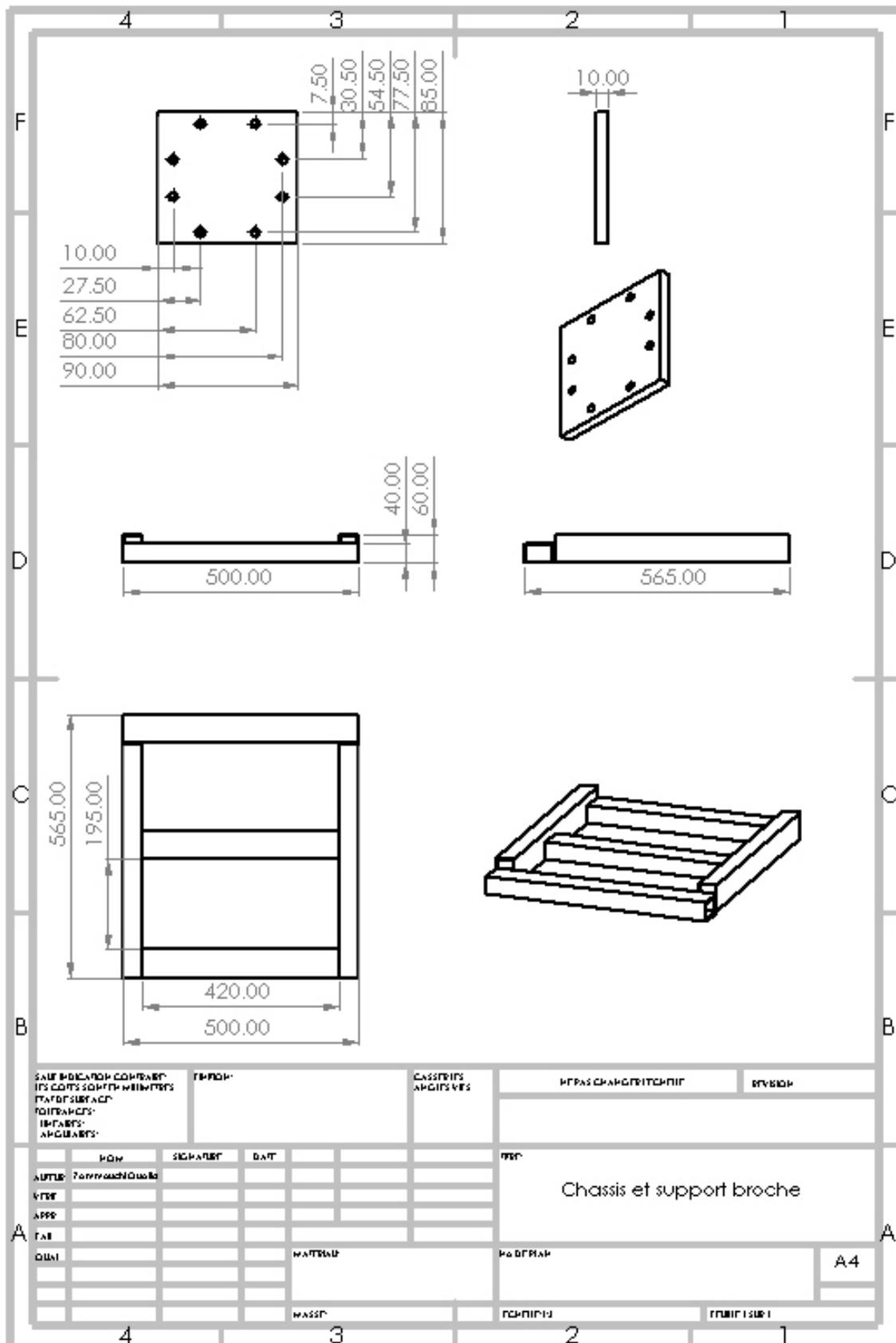
- la machine peut être beaucoup plus grande si nous le voulions, mais elle nécessite des moteurs pas à pas avec un couple plus élevés ou peut-être des servomoteurs.
- Nous pouvons améliorer la broche en utilisant une broche plus puissante refroidie à l'eau, ce qui nous permettra d'usiner plus longtemps et des matériaux plus durs comme l'acier.
- Nous aurions dû concevoir la machine avec des rainures au lieu de trous pour la fixation par vis pour nous donner une plus grande marge d'erreur pour compenser notre manque d'expérience pratique dans la fabrication.

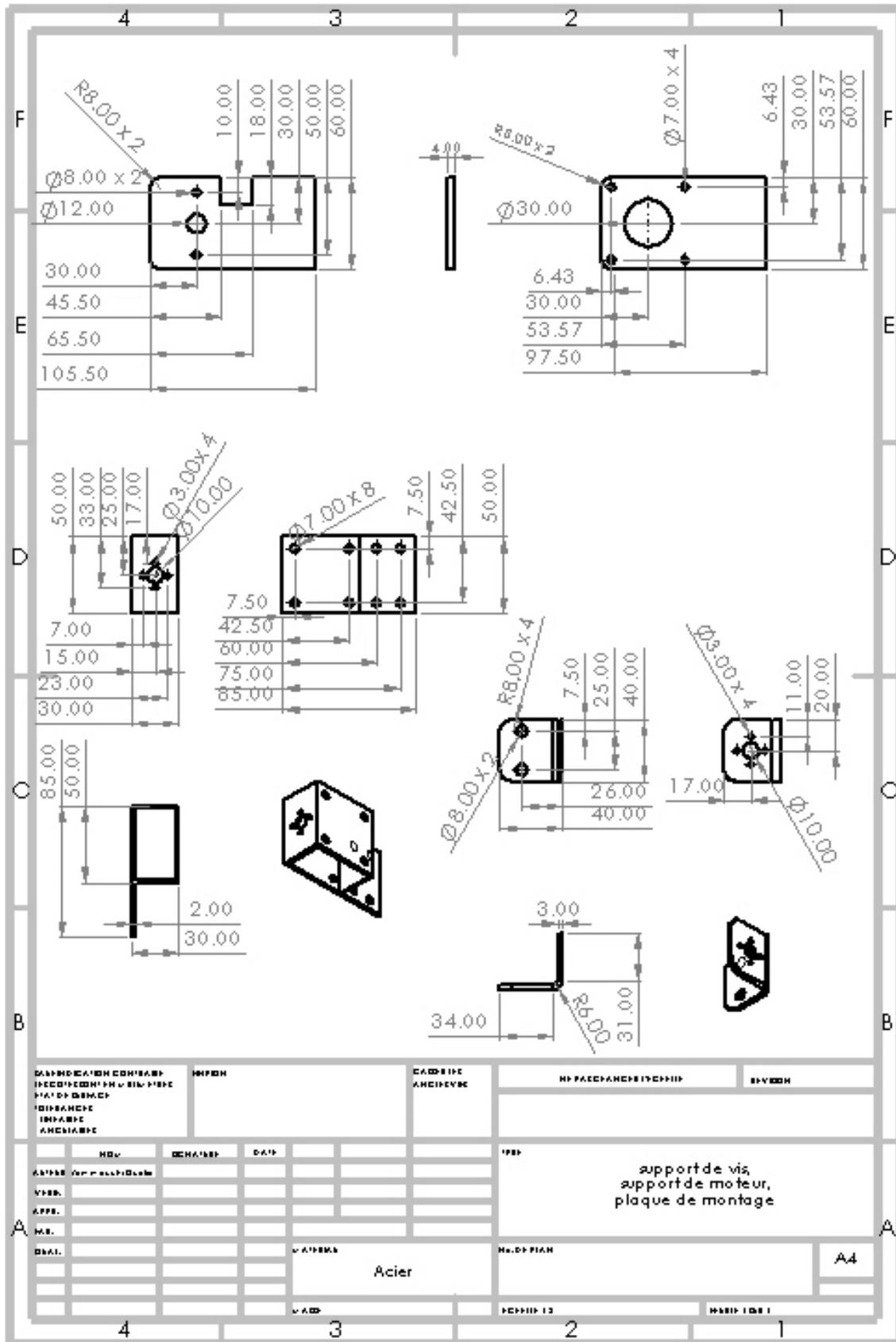
# Bibliographie

- [1] Notes de cours de Farid ASMA Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algerie, 2007/2008, Le Chapitre 1 : Introduction à la commande numérique.  
[https://www.academia.edu/25070656/Chapitre\\_1\\_Introduction\\_à\\_la\\_commande\\_numérique](https://www.academia.edu/25070656/Chapitre_1_Introduction_à_la_commande_numérique)
- [2] Stratoconception : Procédé original breveté, Prototypage, Outillage et Fabrication Rapides, Novembre 2012, Saint-Dié-des-Vosges, France.  
<https://www.stratoconception.com/procede>
- [3] BELLOUFI Abderrahim, Université Kasdi Merbah Ouargla , Algerie, 2010 Machines-outils à commande numérique, Chapitre II : Eléments d'une MOCN.  
<https://docplayer.fr/51352980-li-elements-d-une-machine-outil-a-commande-numerique.html>
- [4] Danielle Collins, USA November 14, 2019. Linear Motion Tips, A design world resource, How can lead screw backlash be reduced ?  
<https://www.linearmotiontips.com/how-can-lead-screw-backlash-be-reduced/>
- [5] Carlicia Layosa USA Aout 26, 2014. MiSUMi MECH LAB: Sliding guides, part 2: Linear Bushings vs Linear Guides.  
<https://us.misumi-ec.com/blog/sliding-guides-part-2-linear-bushings-vs-linear-guides/>
- [6] Larry Berardinis, USA Février 01, 2005, Machine Design: Belt and chain drives  
<https://wheretheroadforks.com/chain-vs-belt-drive-bike-pros-and-cons/>
- [7] Heason technology Ltd, Technical Blog : Ball screws vs Lead Screws USA, 15 Aout 2019.  
<https://www.heason.com/news-media/technical-blog-archive/ball-screws-vs-lead-screws>
- [8] Carmine Fiore, 2021. MPS electronics: Stepper motors basics: Types, Uses and working principles.  
<https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>
- [9] Andrew Waugh, Canada, 24 Mai 2018, Automation Direct: What is a limit switch?  
<https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/limit-switches/>
- [10] D&T education: Emergency Stop buttons.
- [11] Catalogue de Vis trapézoïdales CONTI, Milano, Italie.  
<http://www.contigroup.it/Catalogo/Catalogo-FR.pdf>
- [12] Bosch Rexroth AG, Roller rail system: General product description, General technical data and calculations.  
[https://www.boschrexroth.com/ics/cat/content/assets/Online/do/LT\\_RRS\\_General\\_Tech\\_Data\\_Calculation\\_EN.pdf](https://www.boschrexroth.com/ics/cat/content/assets/Online/do/LT_RRS_General_Tech_Data_Calculation_EN.pdf)
- [13] Catalogue de roulement : Bearing size info, Juin 2018.  
<http://bearingsize.info/catalogue-online/deep-groove-ball-bearings/bearing-608-zz-isb-obj93532.html>

- [14] Marti Deans, USA Mai 24, 2018. Autodesk : G-Code for CNC programming, édition 2020.  
<https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/cnc-programming-fundamentals-g-code/>
- [15] Jure, Canada 26 Mars 2021, PoBlog, Stepper motor driver-The complete explanation.  
<https://blog.poscope.com/stepper-motor-driver/>
- [16] ELPROCUS, 24 Octobre 2013: What is a stepper motor : Types and its working, édition 5.  
<https://www.elprocus.com/stepper-motor-types-advantages-applications/>
- [17] Oulmi Tassdit et Merzouki Zina, Université de Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algerie, 2014/2015: Conception et étude d'une fraiseuse à commande numérique MOCN.
- [18] Catalogue de moteur pas à pas ElectroCraft , New Hampshire, USA  
<https://www.electrocraft.com/files/SM06EN.pdf>







DESIGNATION CONTRAINT  
 REVISIONS  
 PARTS LIST  
 DIMENSIONS  
 DIMENSIONS  
 DIMENSIONS

NO. PART

DATE

NO. PARTS LIST

REV.

NO.	DESIGNATION	DATE	REV.

support de vis,  
 support de moteur,  
 plaque de montage

Acier

MADE IN FRANCE

A4





**Photo A. 1:** Châssis de la machine



**Photo A. 2:** Plaque d'aluminium brute



**Photo A. 3:** Les composants du portique



**Photo A. 4:** Assemblage préliminaire



**Photo A. 5:** Perçage des plaques support du chariot



**Photo A. 6:** Assemblage et vérification de l'alignement du portique



**Photo A. 7:** Vérification d'alignement de l'axe du moteur et vis trapézoïdale



**Photo A. 8:** Assemblage semi final de la machine



**Photo A. 9** : Découpage et perçage des composants de la machine



**Photo A. 10:** Taraudage des trous



**Photo A. 11:** Assemblage final de la machine



*Photo A. 12: Exemple de découpage*



**Photo A. 13:** Les éléments composants la machine