

## **ABBREVIATIONS**

**MOCN** : Machine Outils à Commande Numérique.

**CN** : Commande Numérique.

**MIT** : Massachusetts Institute of technology.

**GM** : grandeur mesurée.

**CNC** : Commande Numérique par ordinateur.

**PMMA** : Polyméthacrylate de méthyle.

**ABS** : Acrylonitrile butadiène styrène.

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

**CAO** : Conception Assistée par Ordinateur.

**FAO** : Fabrication Assistée par Ordinateur.

**ISO** : Organisation Internationale de normalisation.

## Chapitre I :*Bibliographie*

1. Introduction .....	2
2. Historique.....	2
3. Définition d'une machine-outil à commande numérique.....	4
4. Principe de fonctionnement d'une machine à commande numérique .....	4
4.1 Partie commande .....	5
4.2 Partie opérative .....	5
5. Architecture général des MOCN .....	6
6. Domaines d'utilisation des MOCN.....	6
7. Les familles des machines à commande numérique .....	7
8. Classification des MOCN .....	7
8.1 Classification des MOCN selon le mode de fonctionnement .....	7
8.1.1 Fonctionnement en boucle ouvert .....	7
8.1.2 Fonctionnement en boucle fermée.....	8
8.1.3 Fonctionnement avec commande adaptative .....	9
8.2 Classification des MOCN selon le nombre d'axe .....	9
8.3 Classification des MOCN selon le mode d'usinage.....	10
9. LA machine à commande numérique a trois axes .....	11
10. La gravure.....	12
11. Conclusion.....	12

## Chapitre II :*Etude de projet*

1. Introduction .....	14
2. Étude préliminaire .....	14
2.1. L'idée du projet.....	14
2.2.Description du projet .....	14

2.3. Formulation préliminaire du projet .....	15
2.4. Énoncé du besoin .....	16
2.5. Validation du besoin .....	16
3. Préfaisabilité du projet .....	17
4. Etude Fonctionnelle .....	18
4.1. Diagramme PIEVRE .....	18
4.1.1. Définition des fonctions .....	18
4.2. La méthode FAST .....	19
4.3. Cahier des charges fonctionnel .....	21
5. Type de déplacement .....	22
5.1. Système vis/écrou .....	22
6. Choix des solutions technologiques .....	23
6.1. Structure .....	23
6.2.. Design de la machine .....	26
6.3.. Type Transformation du mouvement R-R .....	27
6.4. Type de Guidage en translation .....	28
7. Modélisation des solutions choisies .....	28
7.1. Chaîne cinématique .....	28
7.2. Graphe des liaisons .....	30

## *Chapitre III : conceptoin et Réalisation*

1. Introduction .....	32
2. Partie mécanique .....	32
2.1. La Conception Assistée par Ordinateur (CAO) .....	32
2.2. Fabrication assistée par ordinateur .....	32
2.3. Logiciel SOLIDWORKS .....	33

2.4.Conception des pièces .....	33
2.4.1..Modélisation 3D des pièces à usinée .....	34
2.4.1.1. Axe Y.....	34
2.4.1.2. Axe X.....	36
2.4.1.3. Axe Z .....	37
2.4.1.4. Accouplement .....	39
2.4.2. Conception des pièces standard .....	39
2.5.Assemblage de la machine CNC .....	41
2.6. Réalisation de la machine .....	41
3. Partie électrique .....	44
3.1. Description des éléments de la partie électrique .....	44
3.1.1. Moteur pas à pas .....	44
3.1.1.1. Les moteurs à réluctance variable .....	44
3.1.1.2. Les moteurs à aimant permanent.....	45
3.1.1.3. Les moteurs hybrides .....	46
3.1.2. Carte Arduino .....	47
3.1.3. Driver moteur pas à pas A4988 .....	47
3.1.4. La carte SHIELD CNC .....	48
3.2. Schéma de câblage électrique global .....	49
4. Réalisation finale de la machine .....	51

## Chapitre IV : *Programmation EtInterface Graphique*

1. Introduction .....	53
2. chaîne de programmation .....	53
3. Description des programme utilisé.....	54
3.1 G-Code .....	54



3.1. Les principales fonctions du G-code .....	54
3.2. Logiciel arduino .....	55
3.2.1. Présentation de logiciel .....	56
3.3. GRBL   57	
3.3.1 Installation GRBL dans la carte ARDUINO .....	57
3.4. Universal G-Code Sender .....	58
3.5. InKscape .....	61
4. Mise en marche de la machine .....	61
4.1. Résultat obtenue .....	63

## Liste des figures

Figure I. 1 : Première MOCN en 1952 [2].	3
Figure I. 2 : Une Machine à commande numérique [3].	4
Figure I. 3 : architecture d'une MOCN [4].	4
Figure I. 4 : Fonction originale d'une commande numérique [4].	5
Figure I. 5 : Les éléments de la partie opérative [4].	5
Figure I. 6 : modèle de la structure d'une machine-outil.	6
Figure I. 7 : Fonctionnement en boucle ouverte [7].	8
Figure I. 8 : Fonctionnement en boucle fermée [7].	8
Figure I. 9 : Fonctionnement avec commande adaptative [7].	9
Figure I. 10 : catégories des mode d'usinage [8].	10
Figure I. 11 : fraiseuse à commande numérique a trois axes [9].	11
Figure I. 12 : gravure de bois par une MOCN.	12
Figure II. 1 : Schéma des constituants de la machine.	14
Figure II. 2 : Actigramme de la machine.	15
Figure II. 3 : Organigramme d'analyse du besoin.	15
Figure II. 4 : Diagramme bête à corne de la Machine CNC.	16
Figure II. 5 : Diagramme du pieuvre	18
Figure II. 6 : Méthode FAST [11].	19
Figure II. 7: Diagramme FAST de la fonction principale.	20
Figure II. 8 : système vis/écrou.	23
Figure II. 9 : machine type pont mobile.	23
Figure II. 10 : machine type portique.	24
Figure II. 11 : machine type pont fixe.	24
Figure II. 12 : machine type porte à faux.	25
Figure II. 13 : machine type colonne.	25
Figure II. 14: Accouplement semi-élastique.	27
Figure II. 15 : Système poulie-courroie.	27
Figure II. 16: Graphe de liaison.	30
Figure III. 1: le logo du logiciel SolidWorks.	33
Figure III. 2: Support axe Y.	34
Figure III. 3: portique gauche de l'axe Y.	34

## Liste des figures

Figure III. 4: portique droit de l'axe Y.....	35
Figure III. 5: support moteur axe X.....	35
Figure III. 6: Support axe X.....	36
Figure III. 7: plaque axe X.....	36
Figure III.8: support moteur axe X.....	37
Figure III. 9: Support axe Z.....	37
Figure III. 10: plaque axe Z.....	38
Figure III. 11: support moteur axe Z.....	38
Figure III. 12: accouplement.....	39
Figure III. 13: assemblage des pieces.....	41
Figure III. 14: Assemblage des axes de machine.....	42
Figure III. 15: usinage de L'accouplement.....	43
Figure III. 16: Moteur pas à pas.....	44
Figure III. 17: Moteur pas à pas à reluctance variable [17].....	45
Figure III. 18: Moteur pas à pas à aimant permanent [18].....	46
Figure III. 19: moteur pas à pas hybride [18].....	47
Figure III. 20 : carte Arduino UNO.....	48
Figure III.21 : Driver A4988.....	49
Figure III.22 : La carte SHIELD.....	49
Figure III. 23: assemblage des carte.....	49
Figure III. 24:Schéma de cablage électrique global.....	50
Figure III. 25: réalisation du Schéma électrique.....	51
Figure III. 26: Réalisation finale de la machine.....	51
Figure IV . 1: chaîne de programmation.....	53
Figure IV . 2: Composants de logiciel.....	56
Figure IV . 3: Présentation des boutons.....	57
Figure IV . 4: 1ere étape de l'installation.....	58
Figure IV . 5: 2eme étape de l'installation.....	59
Figure IV . 6: mode manuel.....	60
Figure IV . 7: Mode automatique.....	60
Figure IV . 8: interface de logiciel inkscape.....	61
Figure IV . 9: exemple à graver.....	62

## *Liste des figures*

Figure IV . 10: g-code de la pièce à graver. ....	62
Figure IV . 11: debut de la gravure .....	63
Figure IV . 12: la finalisation de la gravure.....	64

Tableau II. 1 : Cahier des charges fonctionnel. ....	22
Tableau II. 2: type de mouvement de chaque axes. ....	22
Tableau II. 3 :Comparaison entre les deux désignes.....	26
Tableau II. 4: les type de guidage [13]. ....	28
Tableau II. 5 : chaines cinématiques des trois axes. ....	29
Tableau III. 1 :conception des pièces standards.....	40
Tableau IV. 1: Les principales fonctions du G-code. ....	55

# Introduction Générale

Le développement des machines outil a pris une évolution importante ces dernières années. Cette évolution est constatée dans les machine CNC (Computer Numerical Control), aussi appelées MOCN (Machine-Outil à Commande Numérique), de dernière génération qui ont une précision qui n'a jamais été égale auparavant. Cela est dû principalement aux éléments de haute performance qui constituent ces machines, comme les servomoteur, moteur pas à pas, driver, les capteurs, et les cartes d'interface, aussi les éléments mécanique vis et rail de guidage, réducteur, etc. La disponibilité de ces différents éléments des machines CNC, dans le marché mondial, a permis à beaucoup de chercheurs, ingénieur, et même des amateurs de développer leur propre machines CNC.

L'objectif de ce travail est de réaliser un prototype d'une mini fraiseuse à commande numérique constitué de trois axes, permettant de faire des gravures.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres

Le premier chapitre est consacré à la présentation des généralités sur les technologies des machines outil 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 est faite.

Le troisième chapitre est consacré à la conception et la réalisation du système pour les deux parties, mécanique et électrique.

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

En outre, le mémoire comporte aussi une introduction, conclusion générale et références bibliographiques.

# *Chapitre I : Bibliographie*

---

### 1. Introduction:

Durant ces dernières années, la commande des machines électriques a subi des progrès significatifs. Ces progrès sont essentiellement dus à la révolution technologique en informatique industriel, ce qui a permis le développement de solutions numériques efficaces avec une possibilité d'implanter des algorithmes plus complexes.

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 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:

En **1947**, 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. 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 figure I.1, conçue pour exécuter des déplacements simultanés suivant 3 axes, est officiellement présentée en septembre **1952** figure I.1 dans le Servo mechanisms 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 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).
- 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.
- 1972 : les mini calculateurs remplacent les logiques câblées ; la CN devient CNC.
- 1976 : développements des CN à microprocesseurs.
- 1984 : apparition de fonctions graphiques évoluées et du mode de programmation conversationnel.
- 1986 : les CN s'intègrent dans les réseaux de communication, début de l'ère de la fabrication flexible (CIM).
- 1990 : développement des CN à microprocesseurs 32 bits [2].

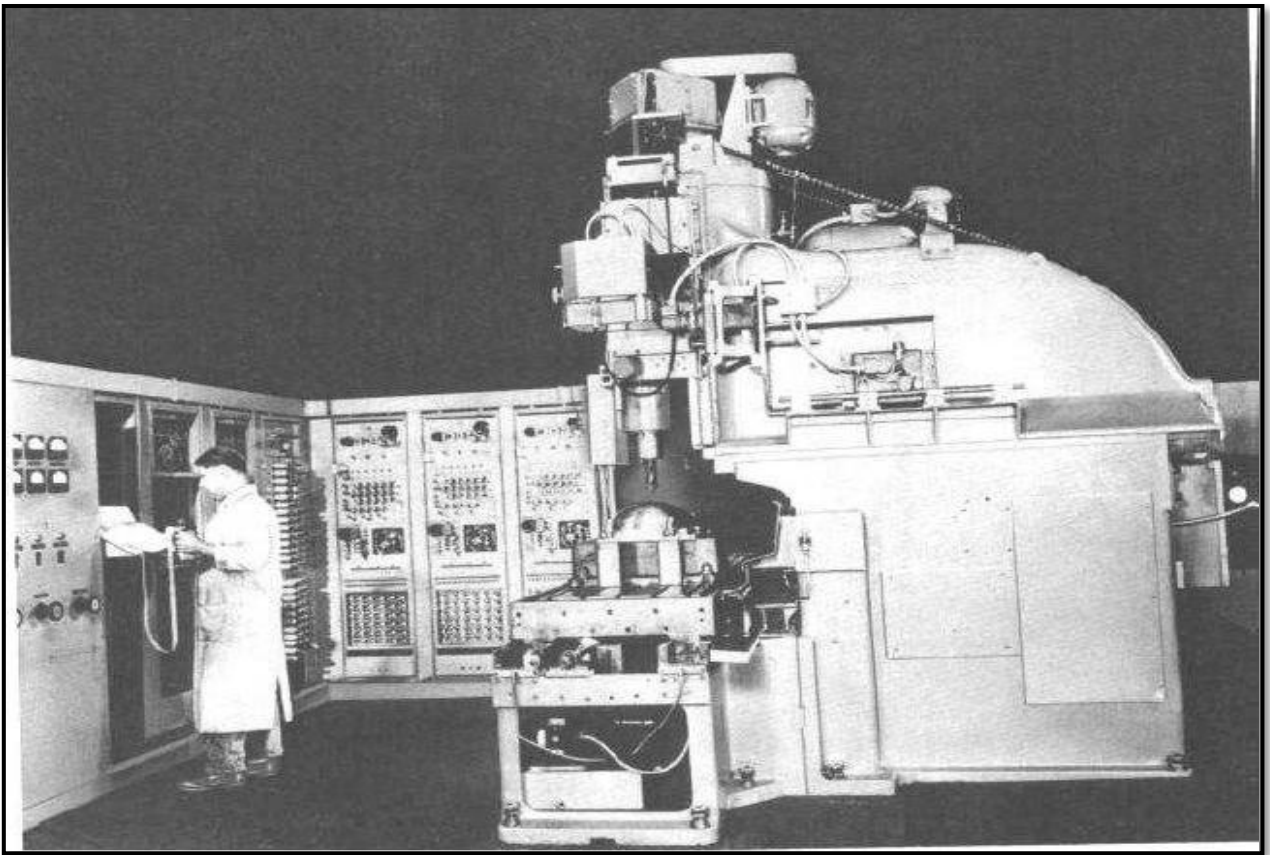


Figure I. 1 : Première MOCN en 1952 [2].

### 3. Définition d'une machine-outil à commande numérique:

La machine-outil à commande numérique figure I.2, est un appareil spécifique piloté par commande numérique constitue son principal champ d'utilisation, permettent d'effectuer automatiquement de nombreuses tâches dans divers domaines d'activité : la gravure et le Perçage des circuits imprimés, la réalisation de petites pièces mécaniques, le traçage et la découpe des divers éléments constituant les modèles réduits, et bien d'autres Choses encore [3].



Figure I. 2 : Une Machine à commande numérique [3].

### 4. Principe de fonctionnement d'une machine à commande numérique:

Une machine-outil à commande numérique est composée de deux principales parties une partie command est une partie opérative, voir Figure I.3.

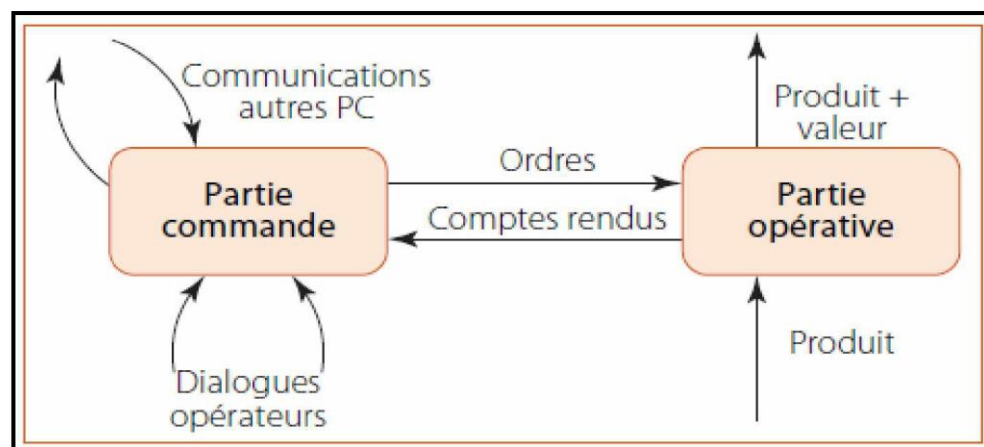


Figure I. 3 : architecture d'une MOCN [4].

#### 4.1. Partie commande:

La fonction de la partie commande est de transformer les informations codées du programme en ordres aux servomécanismes de la partie opérative, afin d'obtenir les déplacements des organes mobiles, voir Figure I.4 [4].

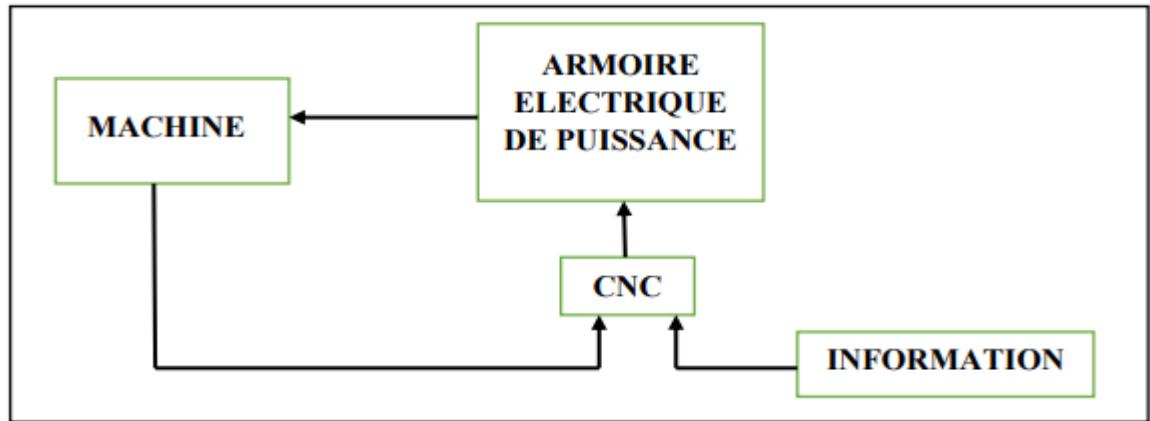


Figure I. 4 : Fonction originale d'une commande numérique [4].

#### 4.2. Partie opérative:

La partie opérative d'un automatisme est le sous-ensemble qui effectue les actions physiques (déplacement, usinage, lubrification...), mesure des grandeurs physiques (accélération, vitesse...) et rend compte à la partie commande, elle est généralement composée d'actionneurs, de capteurs, d'effecteurs et d'un bâti. D'où la partie opérative reçoit les ordres de la partie commande et les exécute, voir Figure I.5 [4].

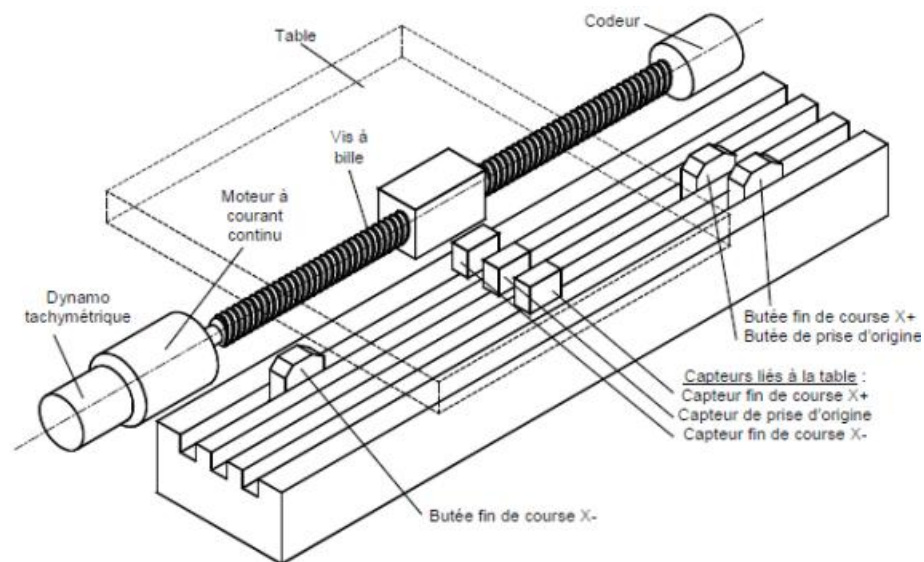


Figure I. 5 :Les éléments de la partie opérative [4].

## 5. Architecture général des MOCN:

Une MOCN est composée de cinq ensembles organisés en boucle, à savoir : la structure de la MO, le porte-pièce, la pièce, le porte-outil et l'outil. On représente la structure d'une machine Figure I.6, en cours d'usinage, par un système bouclé, chaque élément contribue à la réalisation du contrat fonctionnel. Le réglage de la machine consiste à mettre en position relative ces différents éléments [5].

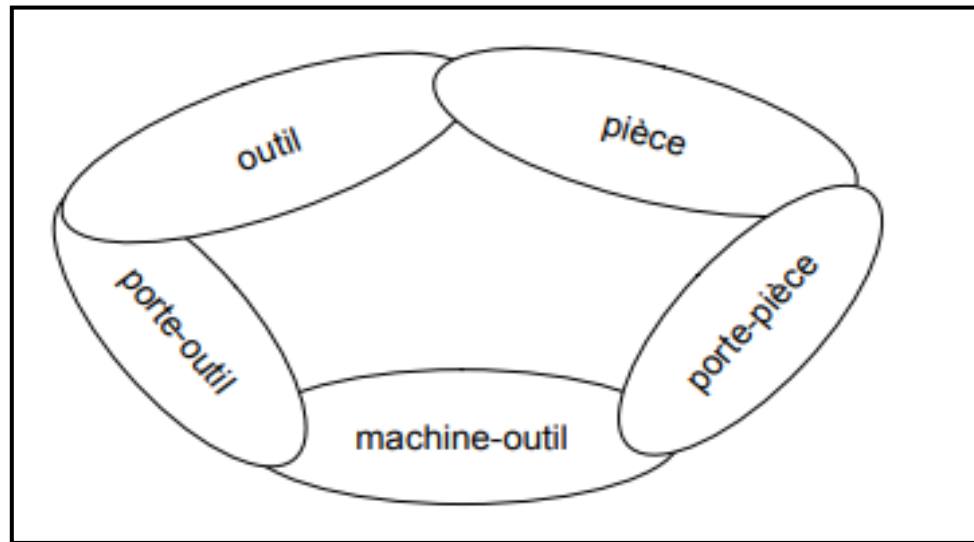


Figure I. 6 :modèle de la structure d'une machine-outil.

## 6. Domaines d'utilisation des MOCN:

Les MOCN sont employées dans de nombreux secteurs industriels (Métallurgie, Bois, Textile). Elle est aussi associée à de nouvelles technologies de façonnage (Laser, Électro-érosion, Jet d'eau) [6].

Les principaux procédés de fabrication sont concernés :

- Perçage, taraudage.
- Tournage, alésage.
- Fraisage.
- Rectification.
- Oxicoupage, soudure en continu, par points.
- Poinçonnage, cisailage.

## 7. Les familles des machines à commande numérique:

On peut découper la famille des commandes numériques en quatre sous familles de machines:

- Fraisage à commande numérique (FCN).
- Tournage à commande numérique (TCN).
- Rectification à commande numérique.
- électro-érosion à commande numérique.

Dans chaque famille, les méthodes de montage et de travail sont totalement différentes, mais elles se rejoignent sur le principe de programmation, la grande majorité des machines utilisant un langage ISO. À cela peuvent se rajouter des interfaces dites conversationnelles ou par apprentissage qui simplifient l'utilisation de la machine. La notion de commande numérique s'étend aussi au domaine de la chaudronnerie : découpage plasma, presse plieuse.

## 8. Classification des MOCN:

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

- Le mode de fonctionnement de la machine.
- Le nombre d'axes de la machine.
- Le mode d'usinage.
- Le mode de fonctionnement du système de mesure.
- Le mode d'entrée des informations.

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

Les MOCN sont classifiées selon les modes de fonctionnement suivants :

#### 8.1.1. Fonctionnement en boucle ouvert:

En boucle ouverte Figure I.7, le système assure le déplacement du chariot mais ne le contrôle pas.

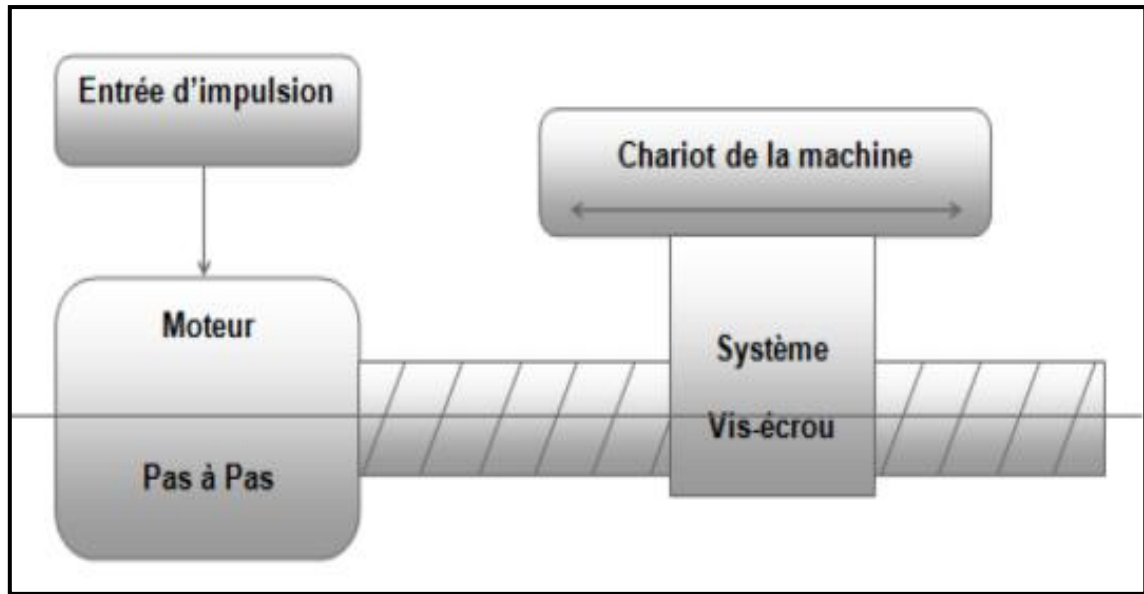


Figure I. 7 :Fonctionnement en boucle ouverte [7].

### 8.1.2. Fonctionnement en boucle fermée:

En boucle fermée figure I.8, le système contrôle le déplacement ou la position jusqu'à égalité des grandeurs entrée (E) dans le programme et celui mesuré (Gm).

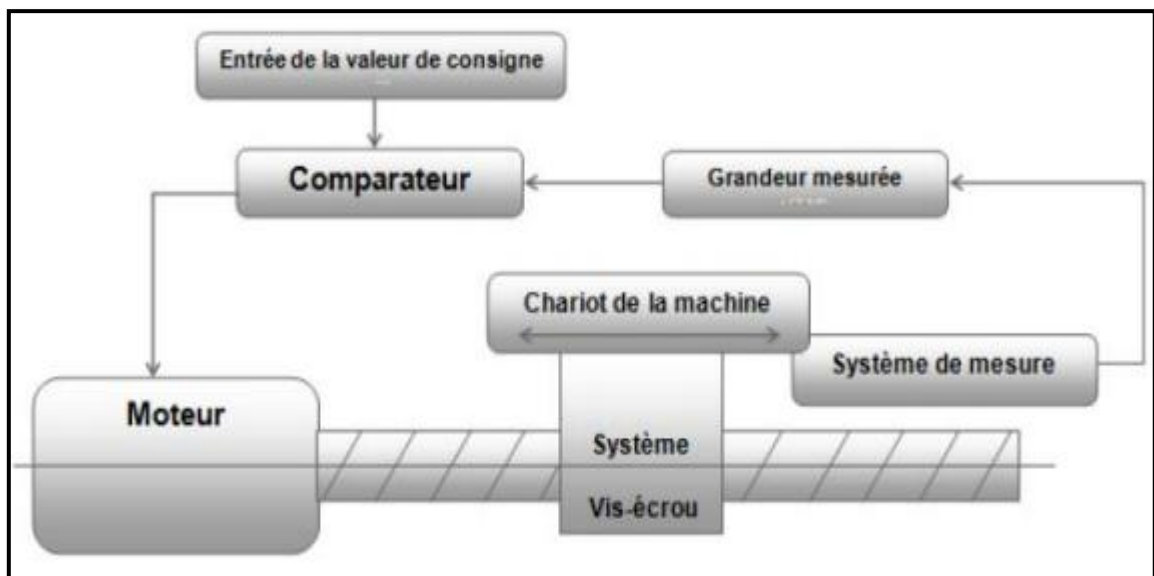


Figure I. 8 :Fonctionnement en boucle fermée [7] .

### 8.1.3. Fonctionnement avec commande adaptative:

La commande adaptative figure I.9, réalise d'une façon continue et automatique l'adaptation des conditions de coupe. Des capteurs relèvent les valeurs de couple de la broche, l'amplitude de vibration de la broche, la température au point de coupe. Ces informations sont transmises à une unité spéciale qui les envoie vers le directeur de commande numérique qui agit selon l'analyse des informations sur les conditions de coupe pour permettre une meilleure qualité de travail, une meilleure productivité et une plus grande sécurité.

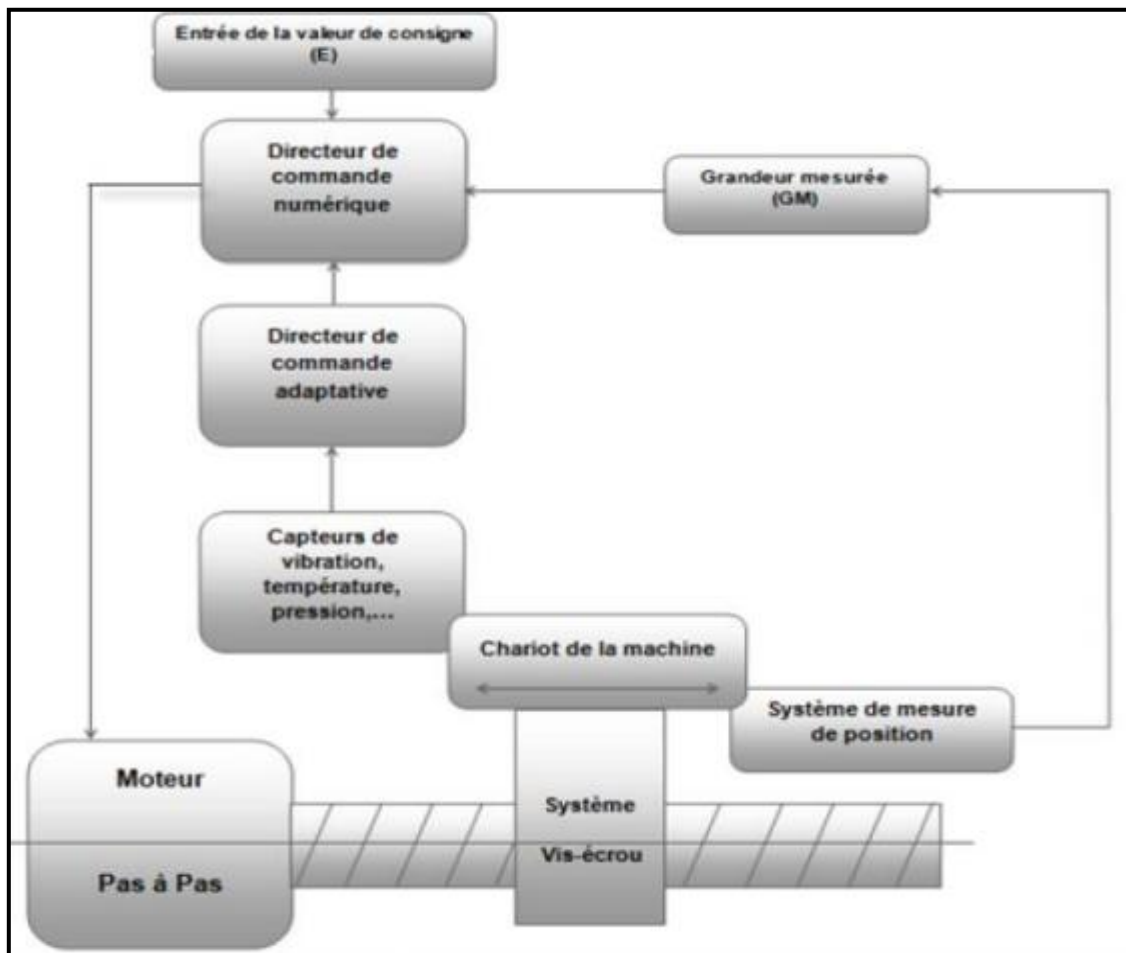


Figure I. 9 :Fonctionnement avec commande adaptative [7].

### 8.2. Classification des MOCN selon le nombre d'axe:

Les possibilités de travail des machines-outils à commande numérique (MOCN) s'expriment en nombre d'axes de travail.



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

Un demi-axe définit la direction dans laquelle l'avance n'est pas contrôlable numériquement mais contrôlé par cames ou plateaux diviseurs [8].

### 8.3. Classification des MOCN selon le mode d'usinage:

On peut classer les MOCN Selon le mode d'usinage en trois catégories, la figure I.10 représente ces trois catégories :

- Commande numérique point à point.
- Commande numérique par axiale.
- Commande numérique de contournage.

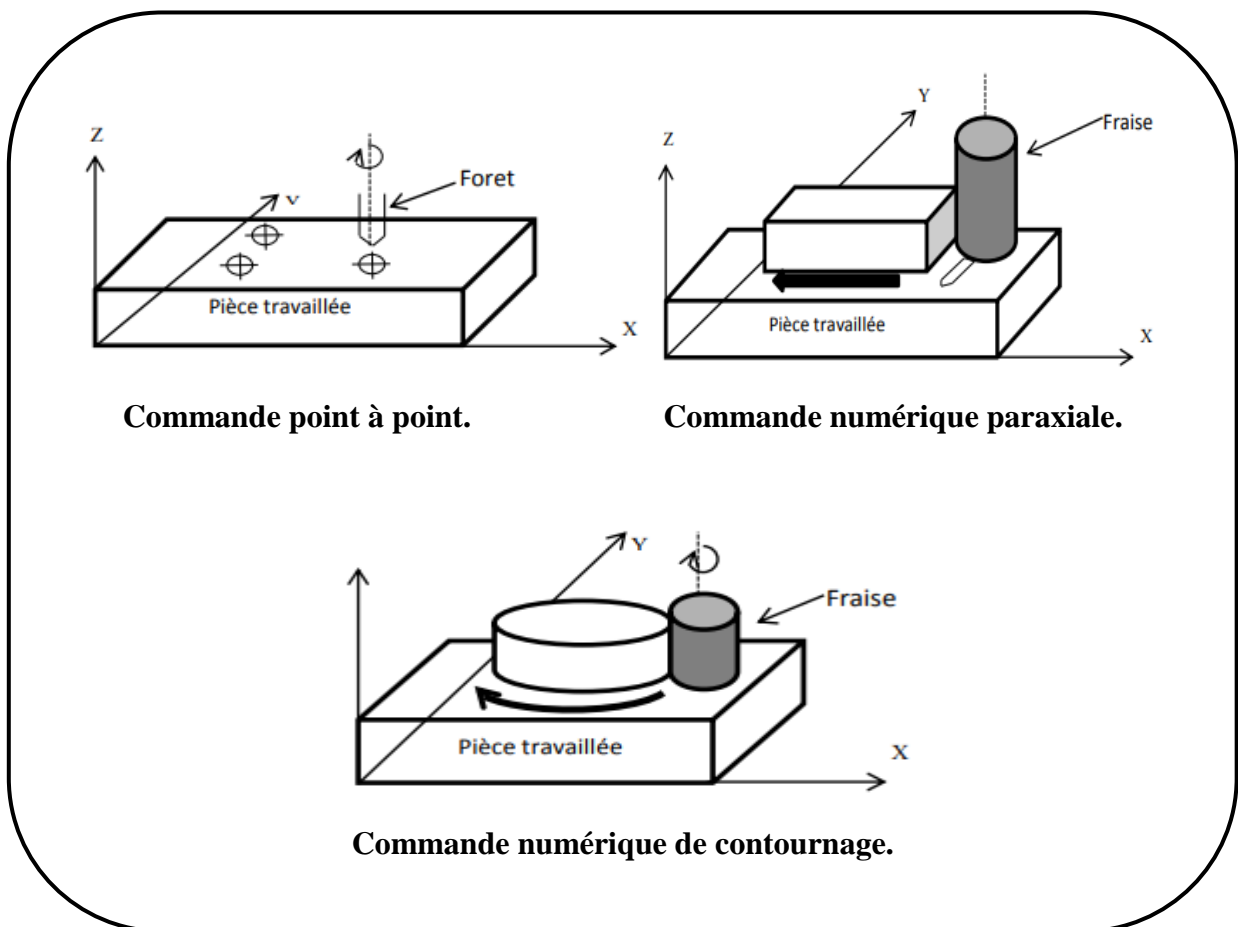


Figure I. 10 :catégories des mode d'usinage [8].



### 9. LA machine à commande numérique a trois axes:

L'usinage trois (3) axes est l'une des techniques les plus employées dans la fabrication de pièces mécaniques. Tel que les machines-outils classiques comme la fraiseuse qui permet un travail de la matière sur trois (3) axes (X, Y et Z). La machine-outil procède alors à l'enlèvement des copeaux suivant trois directions de base correspondant aux axes d'une surface plane. Tout à fait adaptée aux pièces peu profondes. Cependant cette technique a de grosses limites quand il s'agit de traiter une pièce profonde avec des cavités étroites. Pour cela de nouvelles technologies d'usinage ont été développées tel que 4 axes puis axes [9].

La figure I.11 représente une fraiseuse à commande numérique a trois axes.

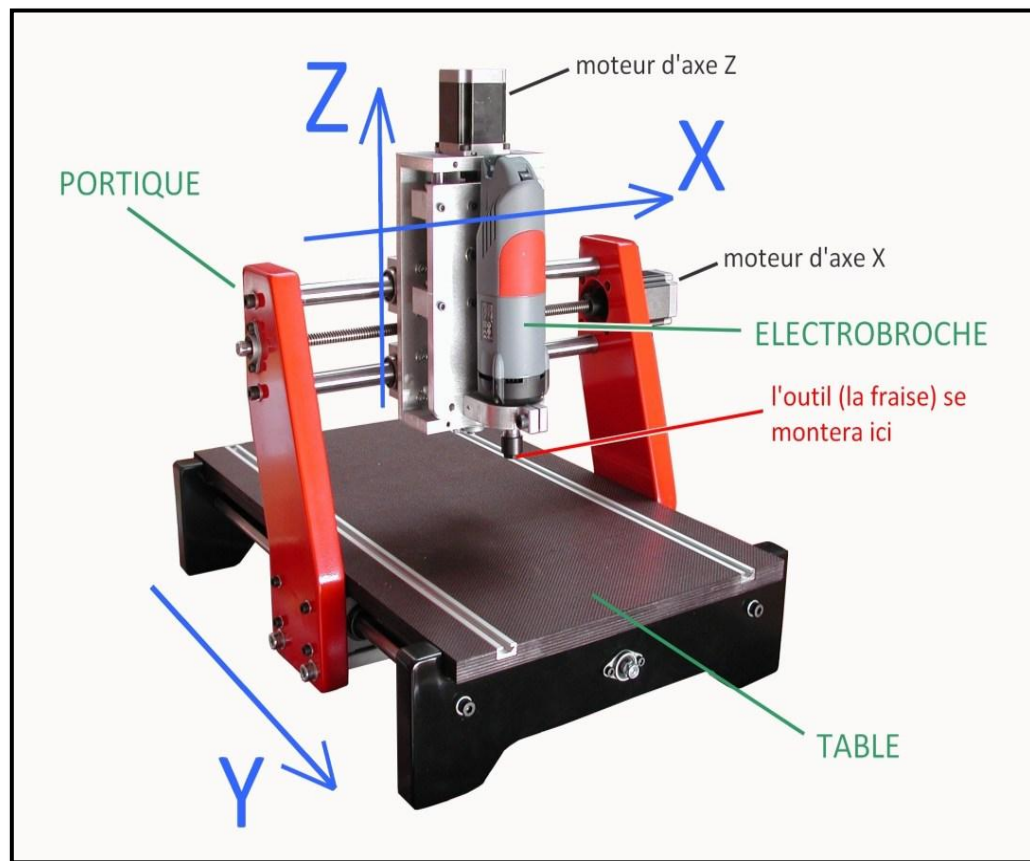


Figure I. 11 : fraiseuse à commande numérique a trois axes [9].

## **10. La gravure:**

La gravure est un procédé d'usinage qui consiste à creuser la matière à l'aide de fraise dit (la fraise de gravure) de tailles et de formes variées. Ce type d'usinage permet de créer une gravure de caractères, symboles ou formes sur des différents matériaux comme le bois, acier, plastique ...

La figure I.12, représente un exemple de gravure sur le bois :



Figure I. 12 :gravure de bois par une MOCN.

## **11. Conclusion:**

Dans ce chapitre on présente un aperçu général sur la technologie des MOCN, elles et nécessaires pour tenir compte des contraintes que toute réalisation se rapporte à ces études qui devraient être respectées.

# *Chapitre II : **E**tude du projet*

---

### 1. Introduction :

dans ce chapitre nous recherchons des solutions techniques qui devant satisfaire en principe les besoins de l'utilisateur de la machine, et en utilisant des outils d'aide à la décision pour choisir la solution la mieux adaptée, qui offre plus de performance et qui respecte mieux les normes des sécurités.

### 2. Étude préliminaire :

#### 2.1. L'idée du projet :

L'idée du projet est de réaliser un prototype d'une mini fraiseuse a commande numerique de 3 axes selon la moyenne disponible.

#### 2.2. Description du projet :

La machine se compose des éléments suivant : voir figure II.1.

- Trois axes linaires qui sont constitués chacun d'un moteur pas à pas, un système de guidage et un système de transformation de mouvement de rotation en translation.
- Broche de fraisage.
- Système de commande.

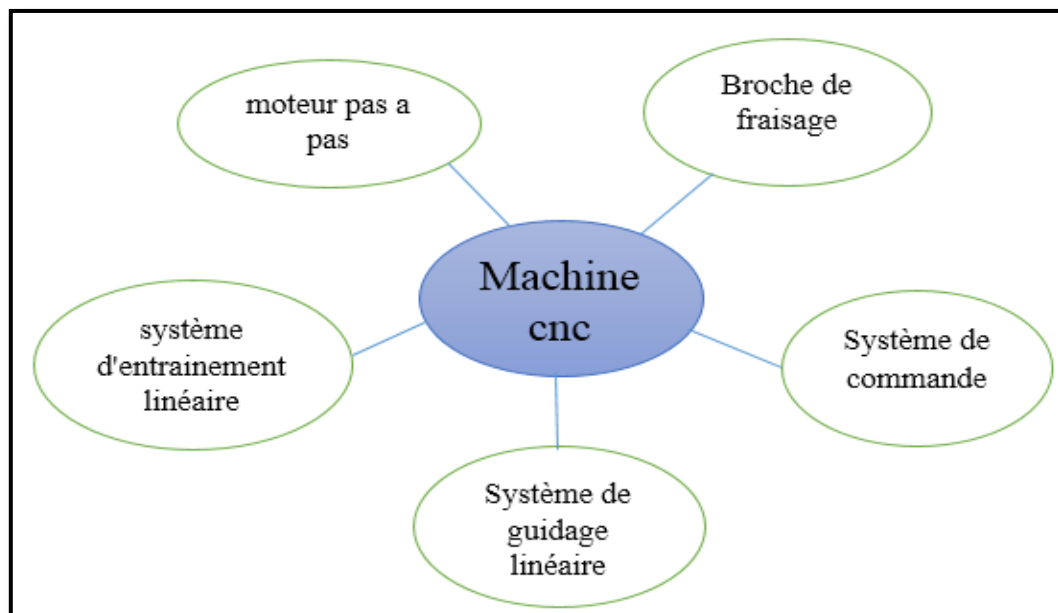


Figure II. 1 : Schéma des constituants de la machine.

Cette machine permet principalement de graver et d'usiner sur des pieces en materiaux plastique, PMMA (polymétachrylate de méthyle), ABS (Acrylonitrile butadiène styrène), forex

Bois. l'Actigramme suivant elle donne une approche globale du fonctionnement de notre machine, voir figure II.2.

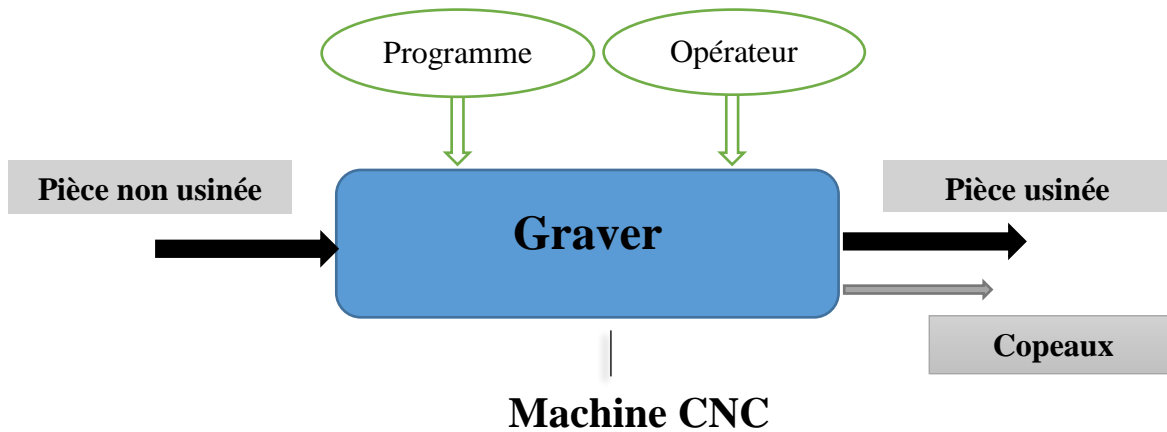


Figure II. 2 : Actigramme de la machine.

### 2.3. Formulation préliminaire du projet :

La formulation préliminaire est la première phase d'un projet. Elle est fondamentale, car elle doit permettre de préciser les enjeux du projet, de conforter le bienfondé de son existence ou de la rejeter.

Analyse préliminaire du besoin:

L'objectif est de montrer que notre système provient d'un besoin industriel à satisfaire. Dans ce cas, la phase analyse comporte les étapes suivantes ,voir figure II.3.

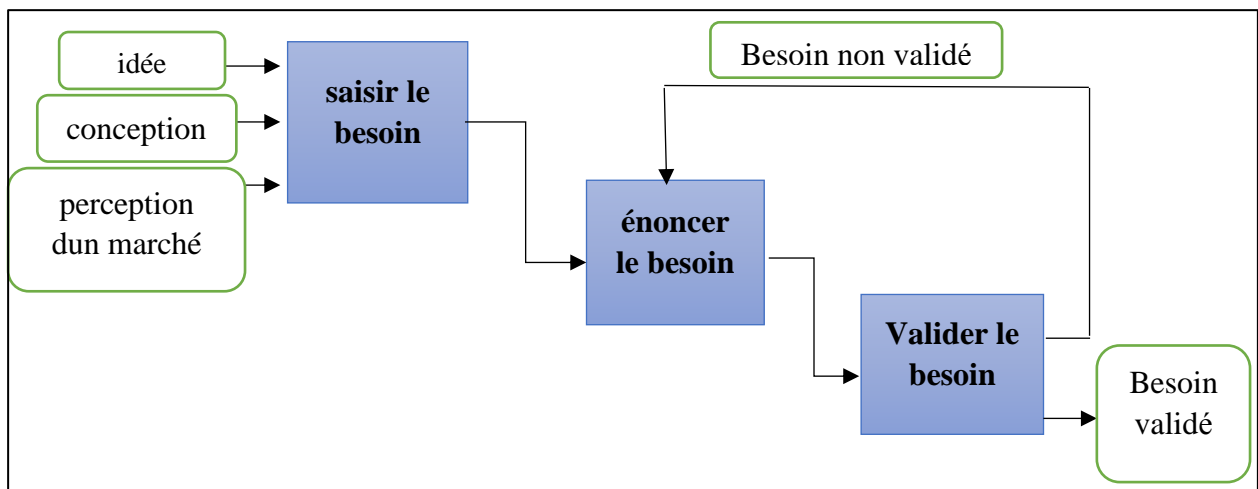


Figure II. 3 : Organigramme d'analyse du besoin.

### 2.4. Énoncé du besoin :

Avant de concevoir un système, il est nécessaire de s'assurer que ce produit répond effectivement à un besoin, d'où l'énoncé du besoin de façon claire et précise. La méthode d'expression du besoin repose sur trois questions: voir figure II.4. [10]

- A qui le produit rend-il service ?
- Sur quoi le produit agit-il ?
- Dans quel but ?

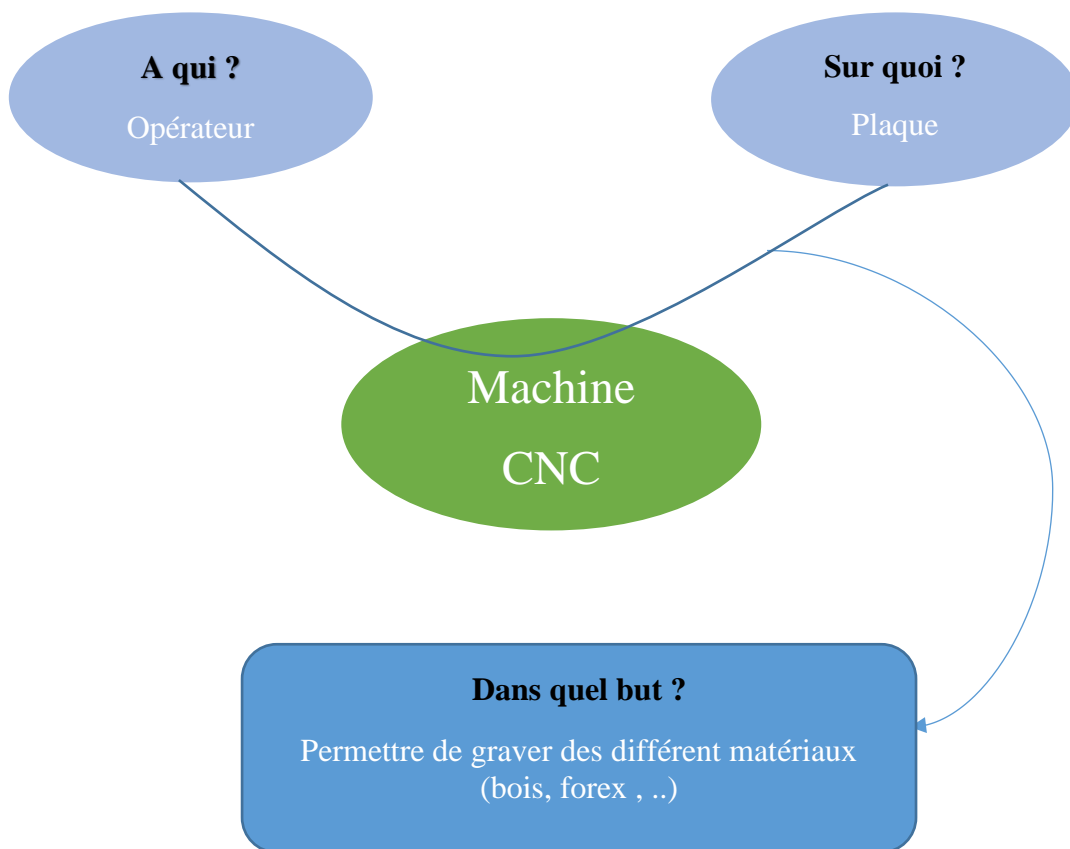


Figure II. 4 :Diagramme bête à corne de la Machine CNC.

### 2.5. Validation du besoin:

Lorsque le besoin est bien défini ,donc il est nécessaire de répondre aux questions suivantes :

*Pourquoi le système machine cnc existe-t-il ?*

Pour remplacer la production manuelle des graveurs .

*Pourquoi ce besoin existe-t-il ?*

Pour faciliter la conception des graveurs, la rapidité, et moindre cout de la production.

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

Ce besoin peut évoluer pour avoir une machine cnc a gravure d'une meilleure congruence et une meilleure performance, en attendant que l'opérateur de la machine soit doté de techniques d'utilisation faciles et mieux adaptées.

### **3. Préfaisabilité du projet :**

Pour savoir si un projet est faisable, il faut que les objectifs de conception soient raisonnables et techniquement réalisables compte tenu des ressources existantes. Le pré-projet doit être confronté aux réalités de l'environnement.

#### **➤ Définition des ressources :**

Il est question dans cette partie des connaissances scientifiques et techniques essentielles pour créer le système. Il faut être en mesure de les connaître, et si possible, de les faire évoluer suivant les besoins du projet.

- Les connaissances scientifiques : mécanique, informatique, automatique, électronique
- Les connaissances techniques : d'ajustage, de soudage, de montage, ...
- Ressources documentaires : bibliothèque de la faculté, ressources en ligne, cours, ...
- Ressources logiciels : SolidWorks, ANSYS, ...
- Ressources matérielles : machines de tournage, fraisage, perçage, soudage, ...
- Ressources humaines : encadreurs, enseignants, ingénieurs de laboratoires
- Ressources financières : autofinancement, aides financières, ...

#### 4. Etude Fonctionnelle:

##### 4.1. Diagramme PIEUVRE :

Le diagramme suivant figure II.5, represent Les fonctions de services associées à la machine CNC :

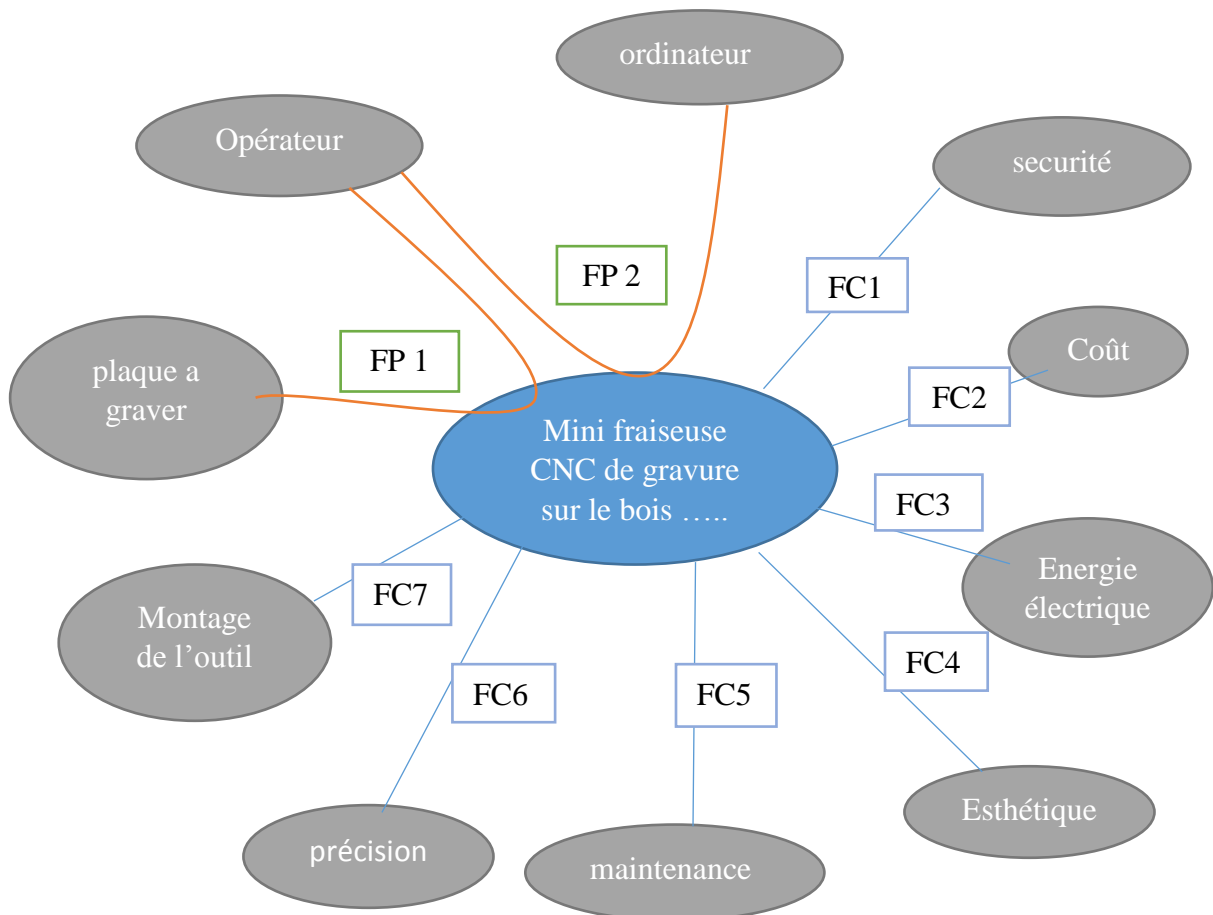


Figure II. 5 :Diagramme du pieuvre

##### 4.1.1. Définition des fonctions :

FP1 : graver sur les plaques automatiquement.

FP2 : faciliter la communication entre l'opérateur et l'ordinateur.

FC1 : Respecter les normes de sécurité.

FC2 : avoir un prix raisonnable.

FC3 : utiliser une source d'énergie électrique.

FC4 : être esthétique



FC5 : facilité la maintenance.

FC6 : permet de fabriquer des pièces avec une précision élevée.

FC7 : faciliter le montage et le démontage de l'outil.

### 4.2. La méthode FAST :

Les étapes de conception sont basées sur un besoin exprimé sous forme de fonctions de service à travers le cahier de charge fonctionnel. En tenant compte des solutions établies précédemment, il est nécessaire de procéder à une recherche progressive et descendante des fonctions technologiques selon chacune des fonctions de service.

Lorsque les fonctions de services sont identifiées, cette méthode les ordonne et les décompose suivant une logique fonctionnelle pour aboutir (vers la droite) aux solutions technologiques de réalisation.

L'élaboration et le classement des fonctions s'effectuent d'une manière pragmatique en répondant aux questions suivantes : voir figure II.6. [11]

- **Pourquoi** cette fonction existe-t-elle ?
- **Comment** cette fonction existe-t-elle ?
- **Quand** cette fonction existe-t-elle ?

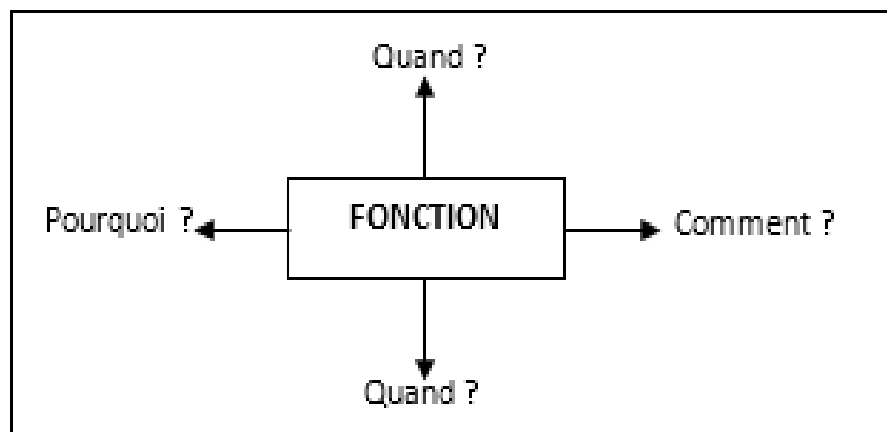


Figure II. 6 :Méthode FAST [11].

Dans ce qui suit, nous présentons le diagramme FAST figure II.7, correspondant aux fonctions de service de la machine CNC.



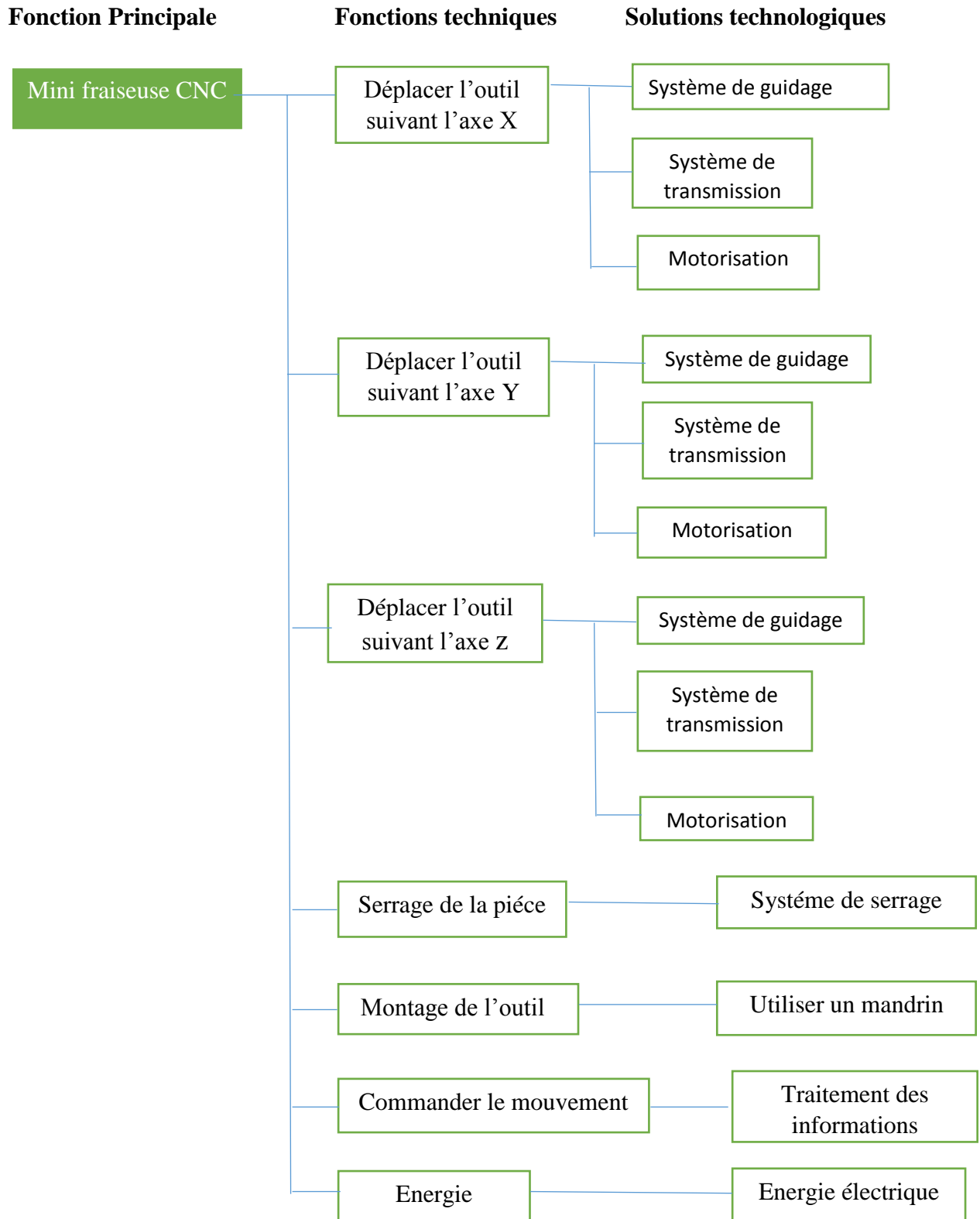


Figure II. 7: Diagramme FAST de la fonction principale.

### 4.3. Cahier des charges fonctionnel :

Un cahier des charges fonctionnel (CdCF) est un document qui présente de manière détaillée et structurée les spécifications, les services à rendre, les contraintes d'un produit.

Le cahier des charges fonctionnel du la fraiseuse cnc est donné par le Tableau II.1 .

Repères	Fonctions	Critère d'appréciation	Niveau
FP1	Gravure	espace de travail	260mmx260mmx60mm
		vitesse maximale	Plus de 2000 tr/ min
		Les outil utiliser	Les outil de gravure
FP2	la communication	Pilotage de la fraiseuse	Commande simple avec visionnage des déplacements
		Logiciels	Universal Gcode Sender – inkscipe - arduino
FC1	Respecter les normes de sécurité	normes de sécurité	-ISO - AFNOR ...
FC2	être commercialisé à un prix raisonnable	prix total de la fraiseuse cnc	$\leq 40\ 000\text{DA}$
FC3	Utiliser l'énergie électrique	type de générateur	Energie électrique 12V
		type de technologie	Toute technologie permettant d'assurer l'alimentation
FC4	Être esthétique	forme	dimensions compatibles
		Couleur	doit être attractif pour être commercialisé
		masse totale du machine	$\leq 35\text{kg}$
FC5	Maintenance	Assemblage boulonné	montage et démontage facile

FC6	Précision	Système de guidage	coulisseaux telescopic
		Les moteur pas a pas	Un moteur Nema 17 avec une Angle de marche de 1,8 °
		Vis ecrou	Utiliser un filetage carré de 2.5 mm de pas
FC7	montage et le démontage de l'outil	Changment des outil	Utiliser une broche moteur

Tableau II. 1 : Cahier des charges fonctionnel.

## 5. Type de déplacement :

La machine à trois axes translate dans l'espace selon les coordonnées cartésiennes (**x**, **y**, **z**). La translation dans chaque axe est occupée par un moteur pas à pas et le système vis/écrou.voir tableau II.2.

Axes	<i>Translation</i>	<i>rotation</i>
<b>X</b>	✓	
<b>Y</b>	✓	
<b>Z</b>	✓	

Tableau II. 2: type de mouvement de chaque axes.

### 5.1. Système vis/écrou :

Le système vis-écrou permet de transformer un mouvement de rotation en un mouvement de translation en combinant les mouvements d'une vis et d'un écrou, (liaison hélicoïdale).voir figure II.8.

le système utilisee pour la fabrication du projet sont trouver dans le cric .



Figure II. 8 :système vis/écrou.

## 6. Choix des solutions technologiques :

### 6.1. Structure :

La norme ISO 10360-1 fixe cinq principaux types de structures à mouvement linéaire, qui peuvent être définies comme suit [12] :

#### ➤ Pont mobile :

Une structure à pont mobile figure II.9, C'est une structure de très bon compromis entre l'accessibilité et la qualité géométrique et la précision. En laboratoire, c'est le type le plus fréquent. Dans ce type de structure c'est le cadre qui se déplace suivant l'axe X et la table est fixe.

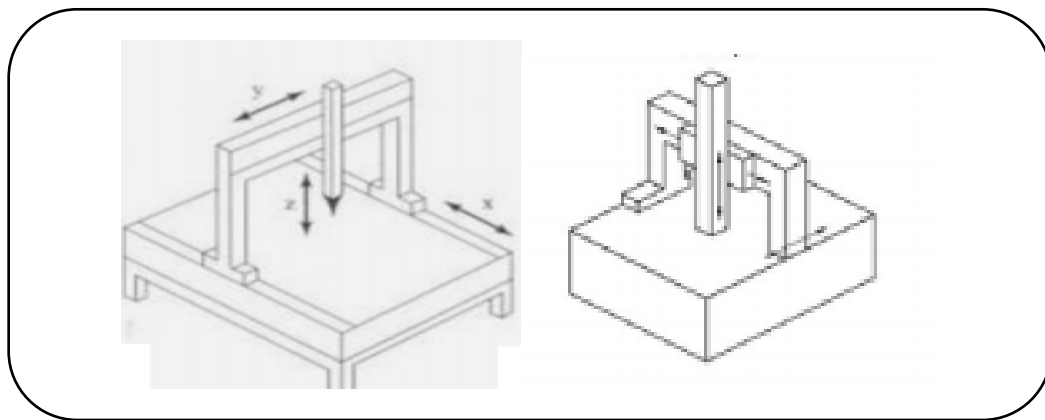


Figure II. 9 :machine type pont mobile.

### ➤ Portique :

Une structure à portique figure II.10, C'est une structure rigide, elle permet d'améliorer la précision de positionnement. Dans ce type de structure la section supérieure du pont qui se déplace et la table est fixe.

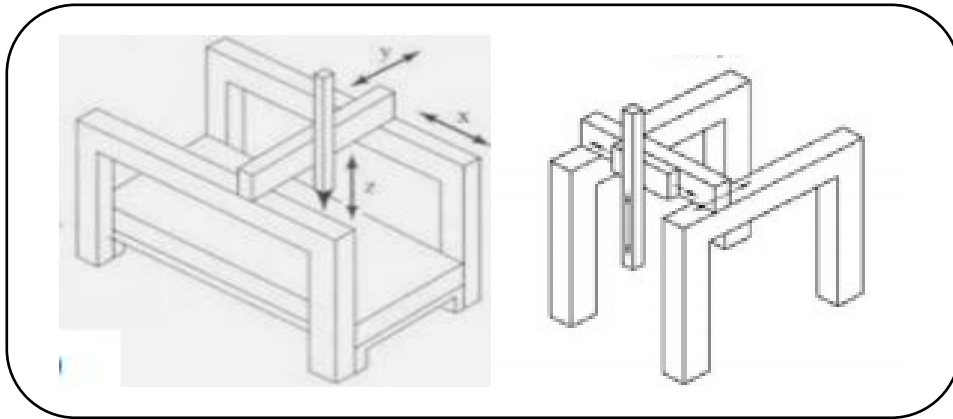


Figure II. 10 :machine type portique.

### ➤ Pont fixe :

Une structure à pont fixe figure II.12, C'est une structure de grande précision. L'inconvénient de la structure est de bouger la pièce ce qui peut devenir un réel problème pour les pièces lourdes. Dans ce type de structure le portique est fixe et la table est mobile suivant l'axe des X.

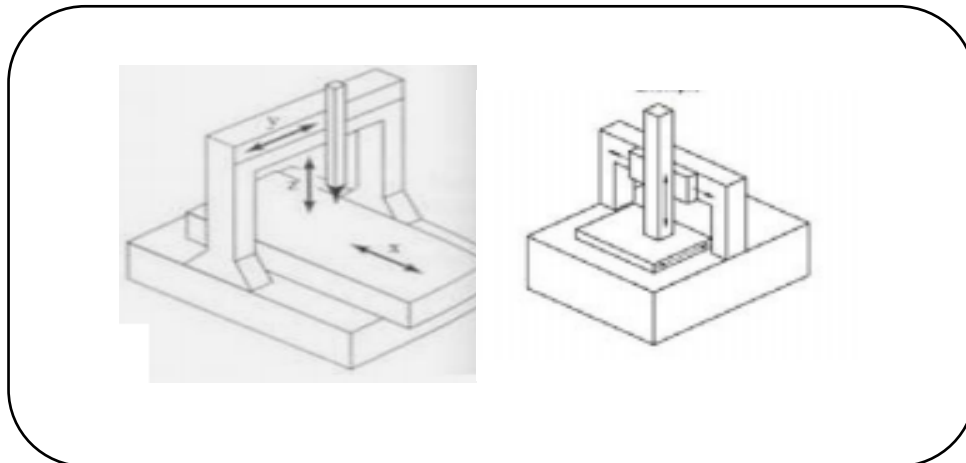


Figure II. 11 :machine type pont fixe.

### ➤ **Porte à faux :**

Une structure à port à faux figure II.3, C'est une structure de bon précision. Dans ce type de structure le portique est fixe et la table est fixe.

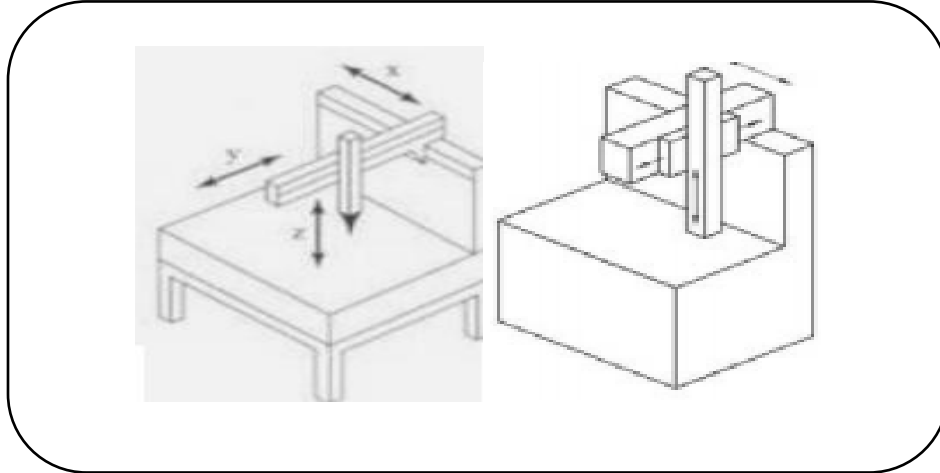


Figure II. 12 :machine type porte à faux.

### ➤ **Colonne :**

Dans la structure à colonne figure II.14, découpe l'axe Z de l'axe des X et de l'axe des Y, ce qui pourrait améliorer la précision. Dans ce type de structure le portique est fixe et la table est mobile suivant les axes des X et Y.

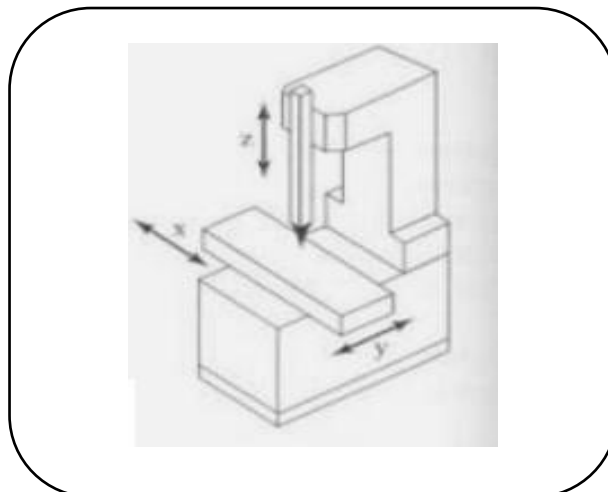


Figure II. 13 :machine type colonne.

Après une recherche des solutions techniques des structure qui devant satisfaire en principe les besoins de l'utilisateur de la machine, et en utilisant des outils d'aide à la décision pour choisir

la solution la mieux adaptée, qui offre plus de performance et qui respecte mieux les normes de sécurité, nous conduit à choisir la structure à pont mobile. Pour la conception d'une machine CNC à trois axes, la structure à pont mobile est la meilleure solution qui est combinée entre l'accessibilité et la qualité géométrique et la précision.

### 6.2. Design de la machine :

Selon la structure choisie précédemment, nous avons proposé deux designs différents, voir Tableau II.3.

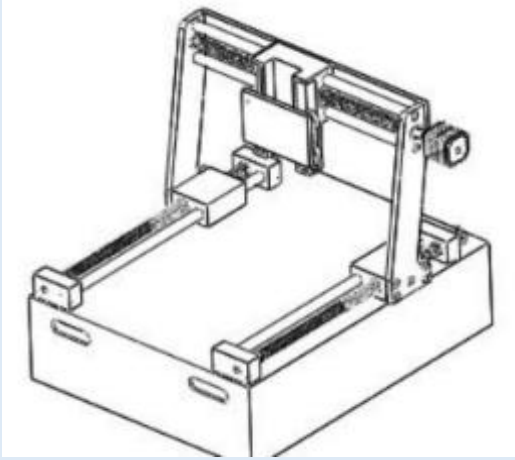
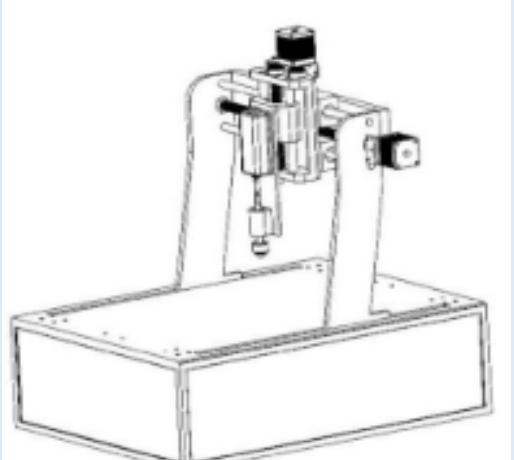
1 <sup>er</sup> design	2 <sup>ème</sup> design
	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deux moteurs pour l'axe y</li> <li>• Deux tiges filetées pour l'axe y</li> <li>• Une surface de travail 220×260mm<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un moteur pour chaque axe</li> <li>• Une tige filetée pour chaque axe</li> <li>• Une surface de travail 260×260mm<sup>2</sup></li> </ul>

Tableau II. 3 : Comparaison entre les deux designs.

Le design 2 présente un choix meilleur vu les arguments suivants:

- Il est plus pratique.
- Présente une grande surface de travail effective.
- Le deuxième design nécessite moins de pièces que la première.



### 6.3. Type Transformation du mouvement R-R :

#### ➤ Accouplement :

L'accouplement est un dispositif de liaison entre deux arbres rotatifs, permettant la transmission du couple.

Il existe des accouplements dits « semi élastiques » qui 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 flexible qui rattrape les défauts d'alignement. Voir figure II.14.



Figure II. 14: Accouplement semi-élastique.

#### ➤ Système poulie-courroie :

Le système à poulies-courroie permet de transmettre un mouvement de rotation. Ce type de mécanisme sert à transmettre le mouvement entre des organes dont les axes sont éloignés. L'inconvénient du système est le glissement de la courroie et sa durée de vie limitée.

La figure II.15 représente un poulie-courroie :



Figure II. 15 :Système poulie-courroie.

Le premier type représente une meilleure solution technologique pour le transfert du mouvement rotatif de la machine a cause de sont avantage.

#### 6.4. Type de Guidage en translation :

Le guidage permet de déplacer une charge suivant une trajectoire linéaire avec une grande précision. De nombreuses solutions existent, leur objectif commun est d’offrir un jeu mécanique réduit, un rendement maximal et une longue durée de vie. Les termes courants associés sont nombreux : rail, guide, coulisseau, glissière, etc...

Tableau II.3, représente quelque type des systèmes de guidage :

Type de guidage	Capacité de charge	Précision	Rigidité	Frottement	Vitesse	Prix
	- +	- +	- +	- +	- +	- +
Guidage sur arbre B6-W avec douille à billes B81-DBKB*						
Guidage sur rail à galets B2-GGLFE						
Guidage à galets combinés B2-GCF						
Guidage à galets modulaire						
Guidage sur rail à 4 rangées de billes B23-GB4E						
Guidage sur rail à rouleaux B22-GRXE						

Tableau II. 4: les type de guidage [13].

Les types des guidage qui est dans le tableau represent les millieur solution de systeme de guidage mais nous avons des contraintes par moyennes limitées ce qui nous ramène à l'utilisation des glissières télescopiques.

### 7. Modélisation des solutions choisies :

#### 7.1. Chaine cinématique :

La conception de la machine passe en premier lieu par l’élaboration de la chaine cinématique. Tableau II.4 donne les chaine cinématiques des trois axes du modele choisi .

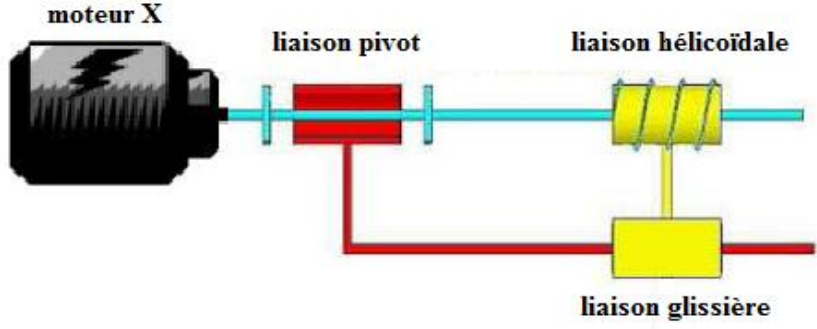
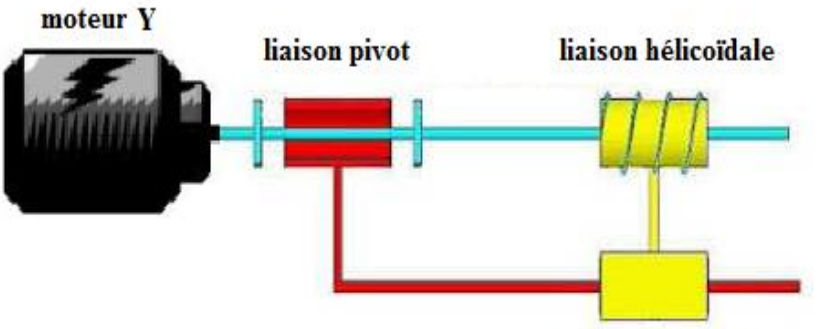
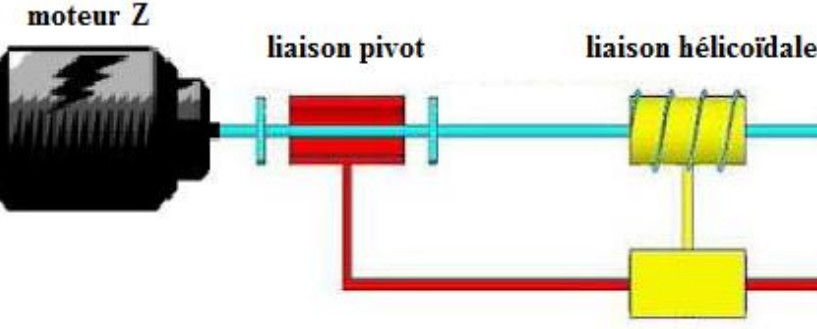
Axes	chaîne cinématique
X	 <p>The diagram for axis X shows a motor (moteur X) connected to a shaft through a pivot joint (liaison pivot). This shaft is then connected to a second shaft via a helical gear joint (liaison hélicoïdale). The second shaft is connected to a yellow rectangular block through a sliding joint (liaison glissière).</p>
Y	 <p>The diagram for axis Y shows a motor (moteur Y) connected to a shaft through a pivot joint (liaison pivot). This shaft is then connected to a second shaft via a helical gear joint (liaison hélicoïdale). The second shaft is connected to a yellow rectangular block through a sliding joint (liaison glissière).</p>
Z	 <p>The diagram for axis Z shows a motor (moteur Z) connected to a shaft through a pivot joint (liaison pivot). This shaft is then connected to a second shaft via a helical gear joint (liaison hélicoïdale). The second shaft is connected to a yellow rectangular block through a sliding joint (liaison glissière).</p>

Tableau II. 5 : chaînes cinématiques des trois axes.



## 7.2. Graphe des liaisons :

Le graphe des liaisons de système est donné par la figure II.16 suivant :

avec :

- **S0** : Support, bâti.
- **S1** : Vis de l'axe Y + moteur+accouplement
- **S2** : Chariot d'avance suivant l'axe Y.
- **S3** : Vis de l'axe X  
moteur+accouplement
- **S4** : Chariot d'avance suivant l'axe X.
- **S5** : Vis de l'axe Z + moteur+accouplement
- **S6** : Porte broche

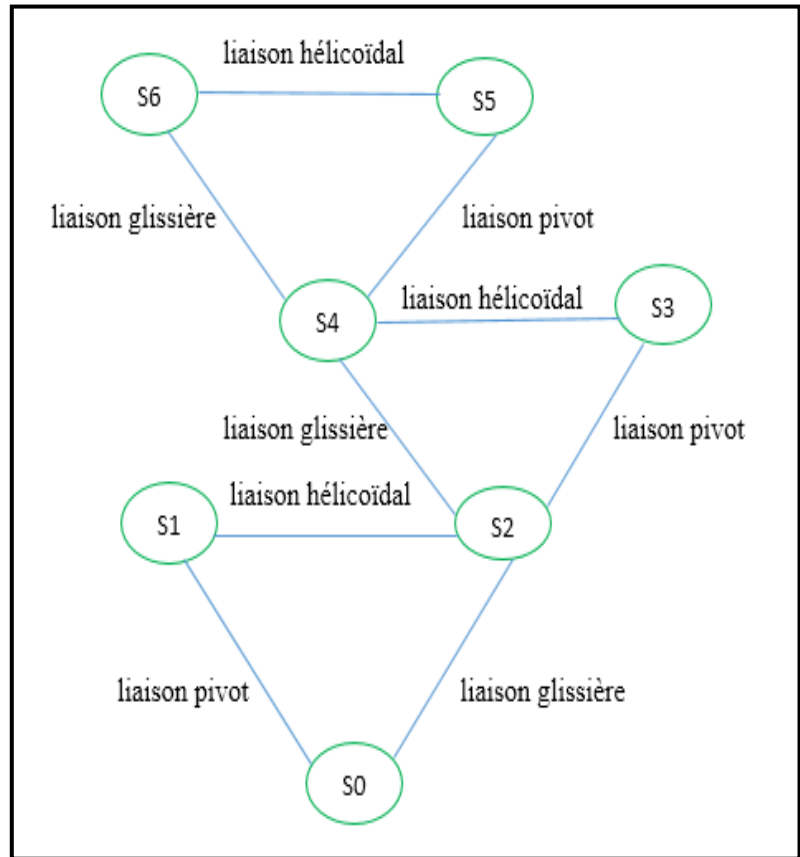


Figure II. 16: Graphe de liaison.

# *Chapitre III: Conceptoin et*

---

# *Réalisation*

---

### 1. Introduction :

Ce chapitre concerne deux parties, une partie mécanique qui décrit le cadre de la conception et la réalisation mécanique de la machine, une partie électrique qui décrit l'étude des circuits utilisés.

### 2. Partie mécanique :

#### 2.1. La Conception Assistée par Ordinateur (CAO) :

La CAO (Conception Assistée par Ordinateur) est un ensemble d'outils et de programmes informatiques permettant d'assister l'ingénieur dans la conception et la mise au point d'un produit. Un système de CAO permet de représenter et d'étudier le fonctionnement d'un objet sans l'avoir fabriqué réellement, c'est-à-dire en virtuel. Il existe un grand nombre de logiciels de CAO ,par exemple [15] :

- SolidWorks.
- FreeCAD.
- OpenCASCADE.
- QCAD...



#### 2.2. Fabrication assistée par ordinateur :

La fabrication assistée par ordinateur ou FAO est d'écrire le fichier contenant le programme de pilotage d'une machine-outil à commande numérique. Ce fichier va décrire précisément les mouvements que doit exécuter la machine-outil pour réaliser la pièce demandée. On appelle également ce type de fichiers : programme ISO ou blocs ISO. Les logiciels de FAO utilisent les modèles et les ensembles créés dans les logiciels de CAO pour générer des trajectoires d'usinage sur lesquelles s'appuient les machines qui convertissent les conceptions en pièces physiques. Il existe un grand nombre de logiciels de FAO, par exemple [16] :

- Catia.
- SolidCAM.
- Camworks...

### **2.3. Logiciel SOLIDWORKS:**

Créé en 1993 par l'éditeur américain éponyme, SolidWorks est racheté le 24 juin 1997 par la société Dassault Systèmes.

SolidWorks est un modèleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés. Un dossier complet contenant l'ensemble des relatifs à un même système constitue une maquette numérique. De nombreux logiciels viennent compléter l'éditeur SolidWorks. Des utilitaires orientés métiers (tôlerie, bois, BTP...), mais aussi des applications de simulation mécanique ou d'image de synthèse travaillent à partir des éléments de la maquette virtuelle [17] .



**Figure III. 1:** le logo du logiciel SolidWorks.

### **2.4. Conception des pièces :**

La conception des différentes pièces de la machine CNC, a été faite à l'aide de logiciel CAO Solidworks version 2018.

### 2.4.1. Modélisation 3D des pièces à usinée :

#### 2.4.1.1. Axe Y:

##### ➤ Support :

La pièce représentée dans la Figure III.2, est le bâtît de la machine CNC, et support l'axe Y.

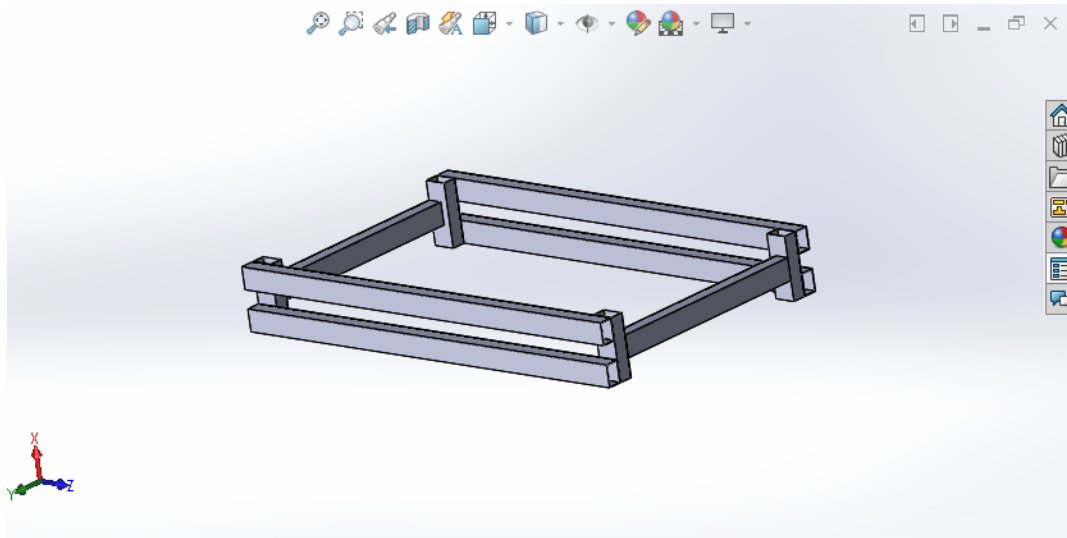


Figure III. 2: Support axe Y.

##### ➤ Portique :

Ce sont les deux pièces principales du chariot de l'axe Y, c'est deux pièces vont supporter les axes X et Z.

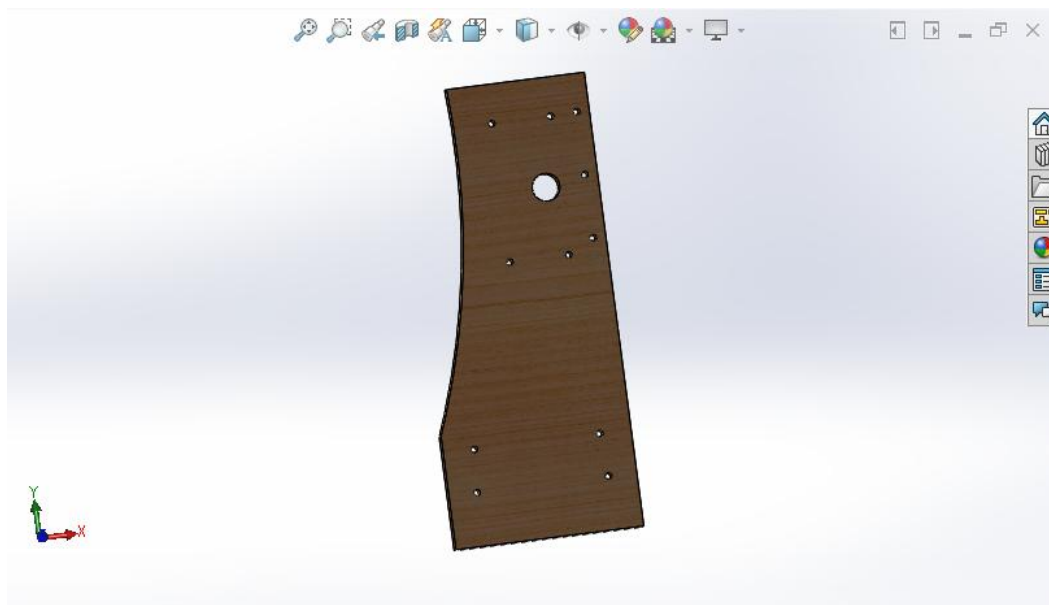
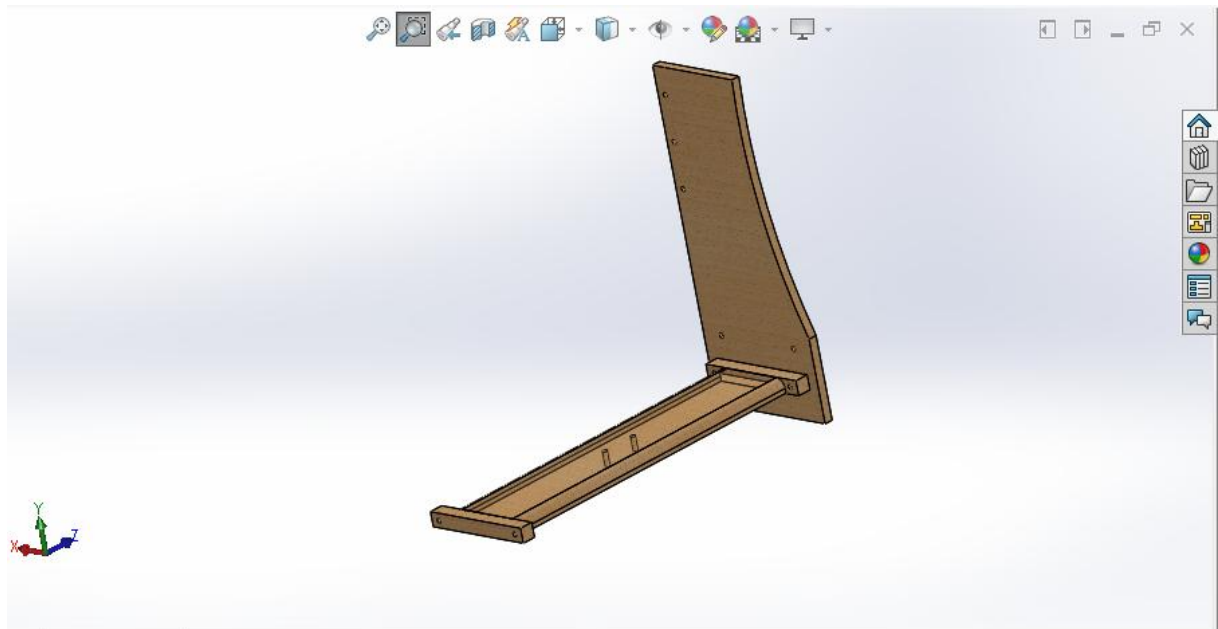


Figure III. 3:portique gauche de l'axe Y.

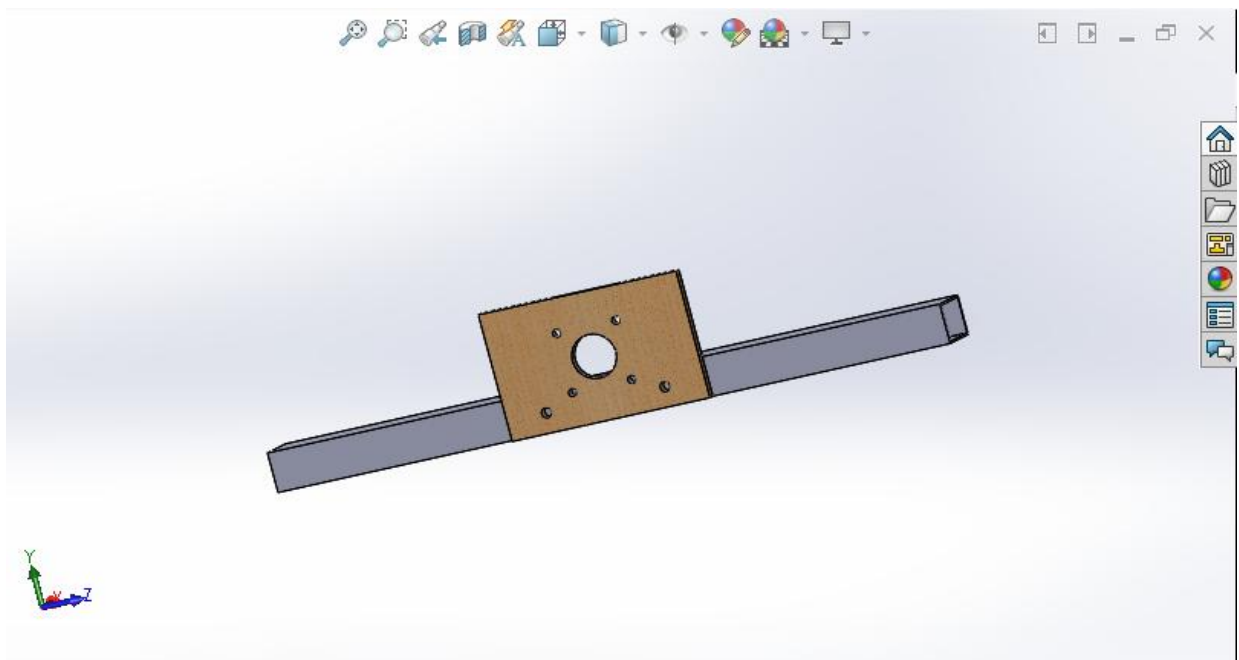




**Figure III. 4:** portique droit de l'axe Y.

➤ **Support moteur:**

Cette pièce est le support moteur pas à pas de l'axe Y.



**Figure III. 5:** support moteur axe Y.

#### 2.4.1.2. Axe X :

##### ➤ Support:

Cette pièce va porter l'ensemble des éléments des axes X et Z.

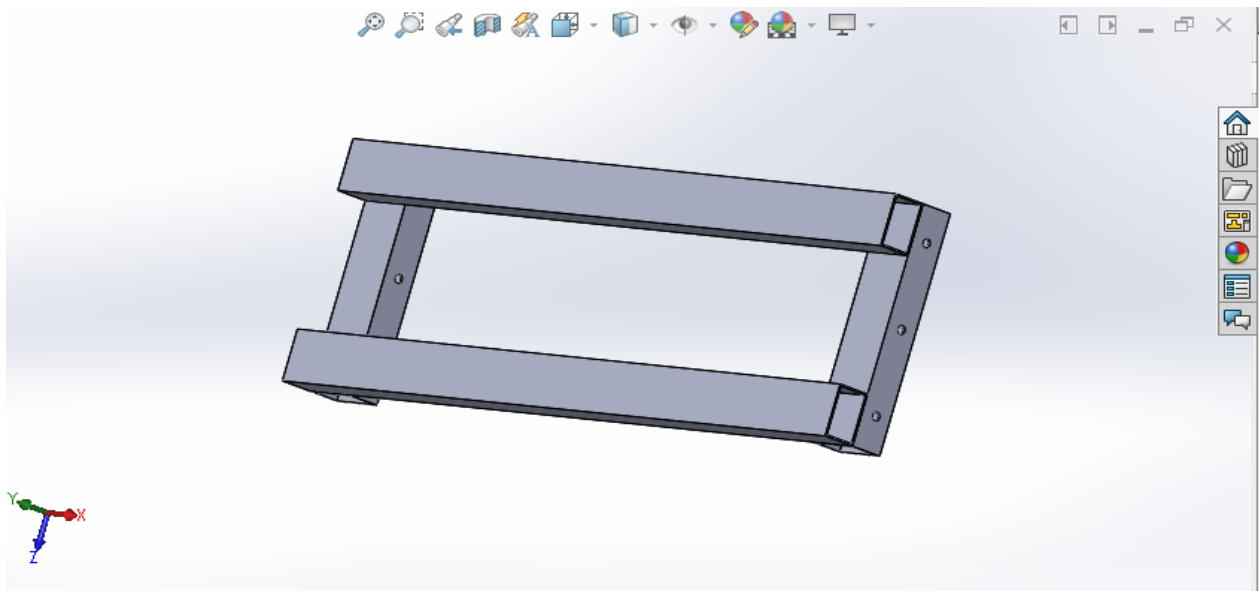


Figure III. 6: Support axe X.

##### ➤ Plaque:

C'est une des pièces qui constituent le chariot de l'axe de X, cette pièce va porter le support du système d'axe Z.

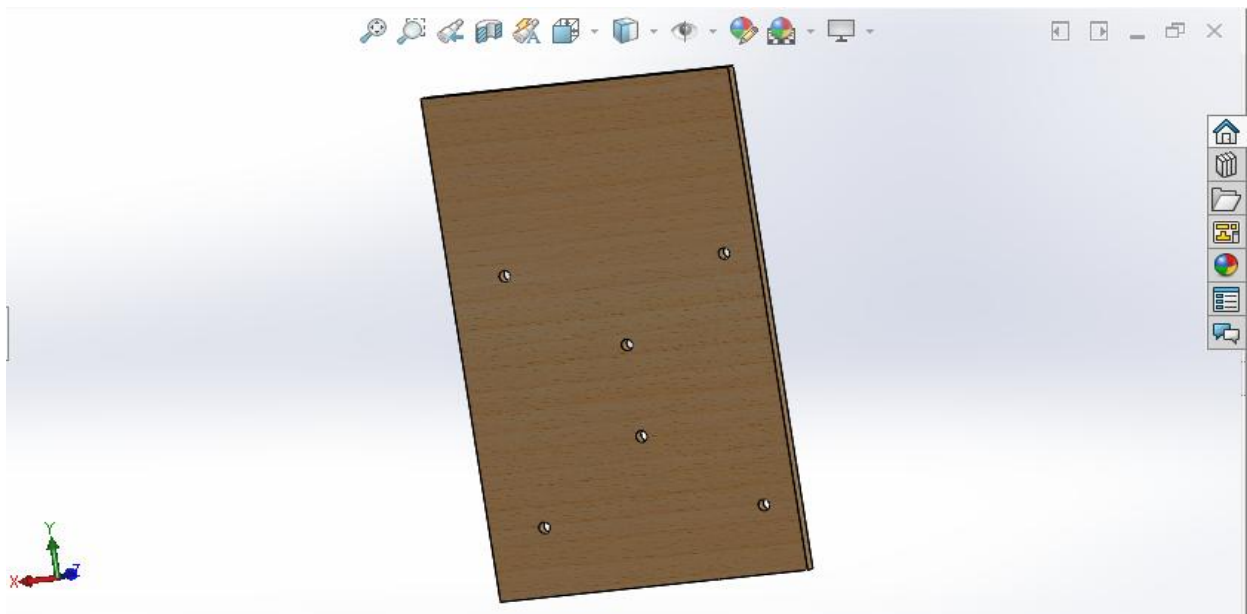


Figure III. 7: plaque axe X.

➤ **Support moteur:**

Cette pièce va porter le moteur pas à pas de système de transmission d'axe X

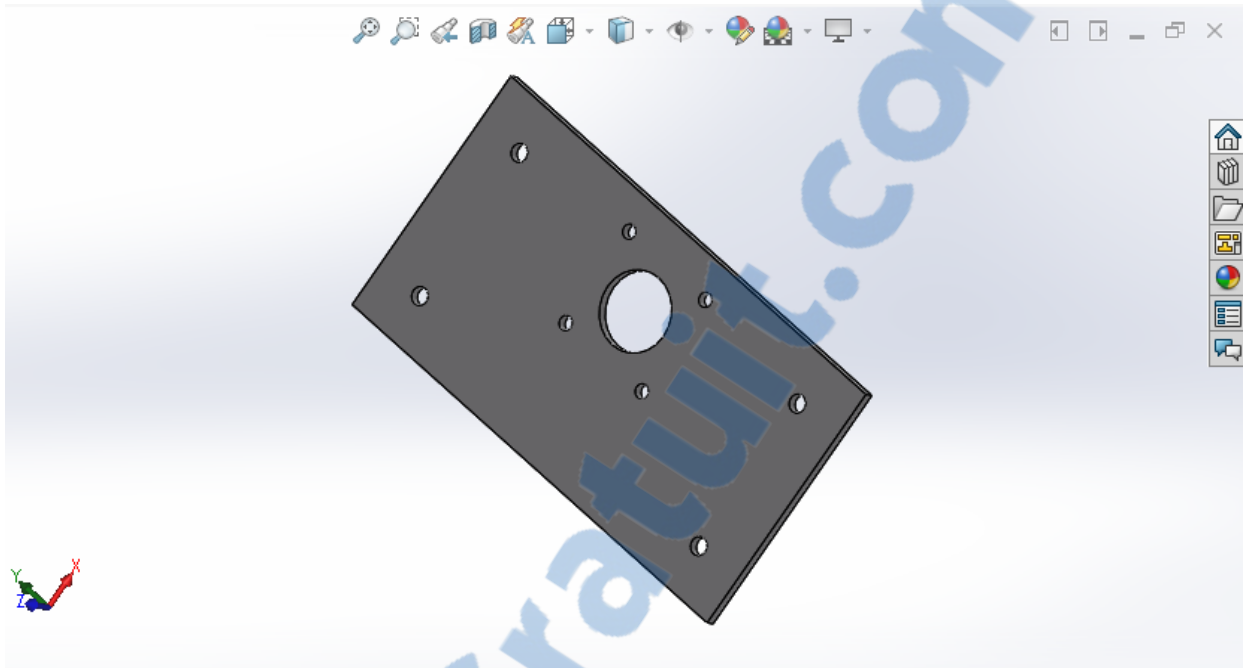


Figure III.8: support moteur axe X.

2.4.1.3. **Axe Z :**

➤ **Support axe Z :**

Cette pièce va porter le système d'axe Z.

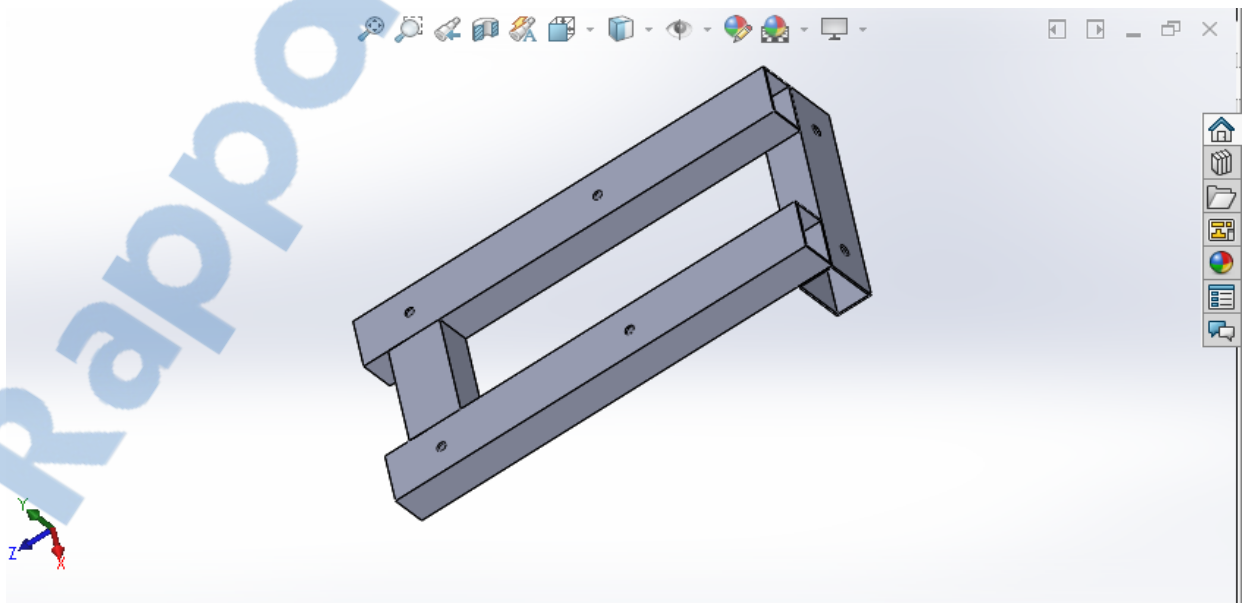
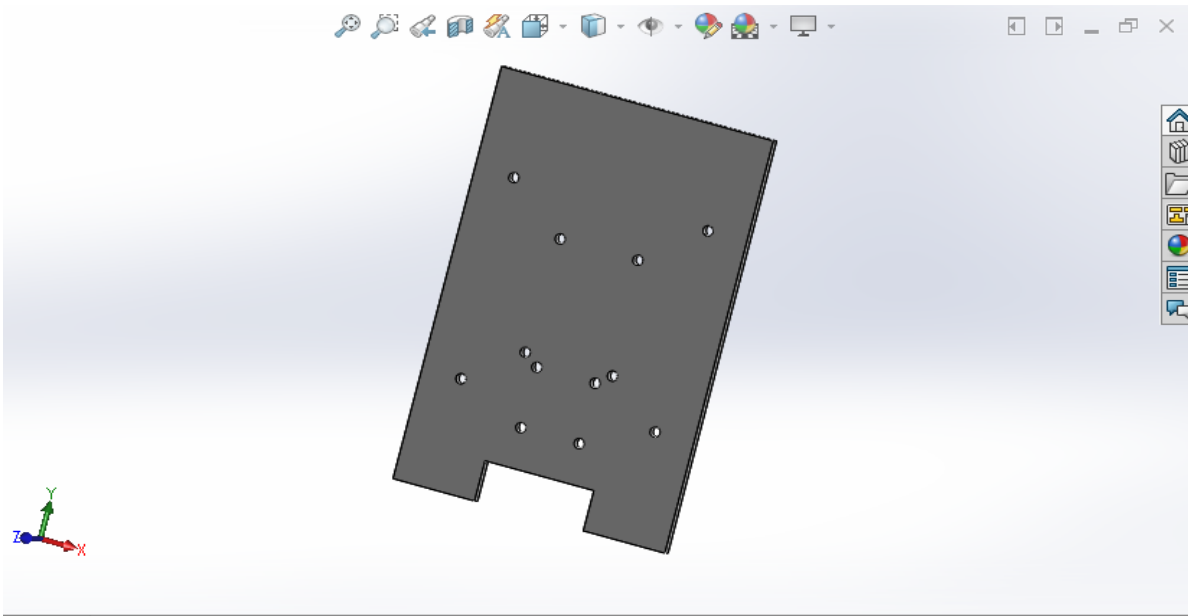


Figure III. 9: Support axe Z.

#### ➤ **Plaque :**

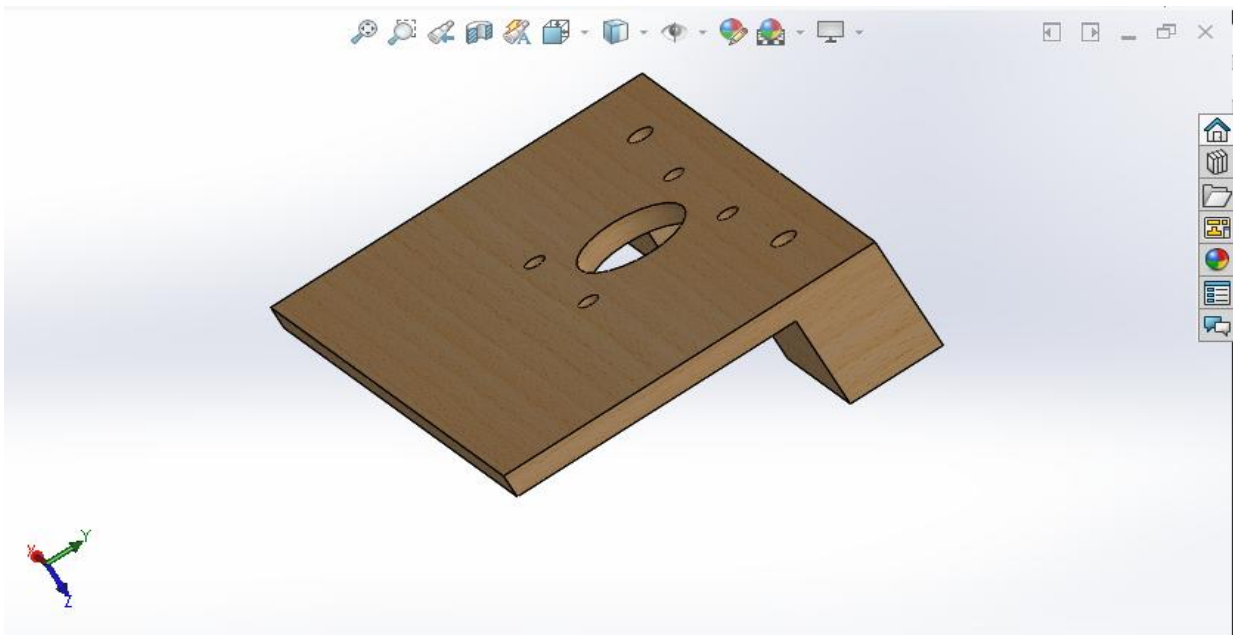
C'est une pièce de chariot de transmission suivant l'axe de Z, cette pièce va porter la broche.



**Figure III. 10:** plaque axe Z.

#### ➤ **Support moteur :**

Cette pièce va porter le moteur pas à pas de système de transmission d'axe Z.



**Figure III. 11:** support moteur axe Z.

#### 2.4.1.4. Accouplement :

C'est pièce représente la lison entre l'arbre de la broche moteur et le mandrin.

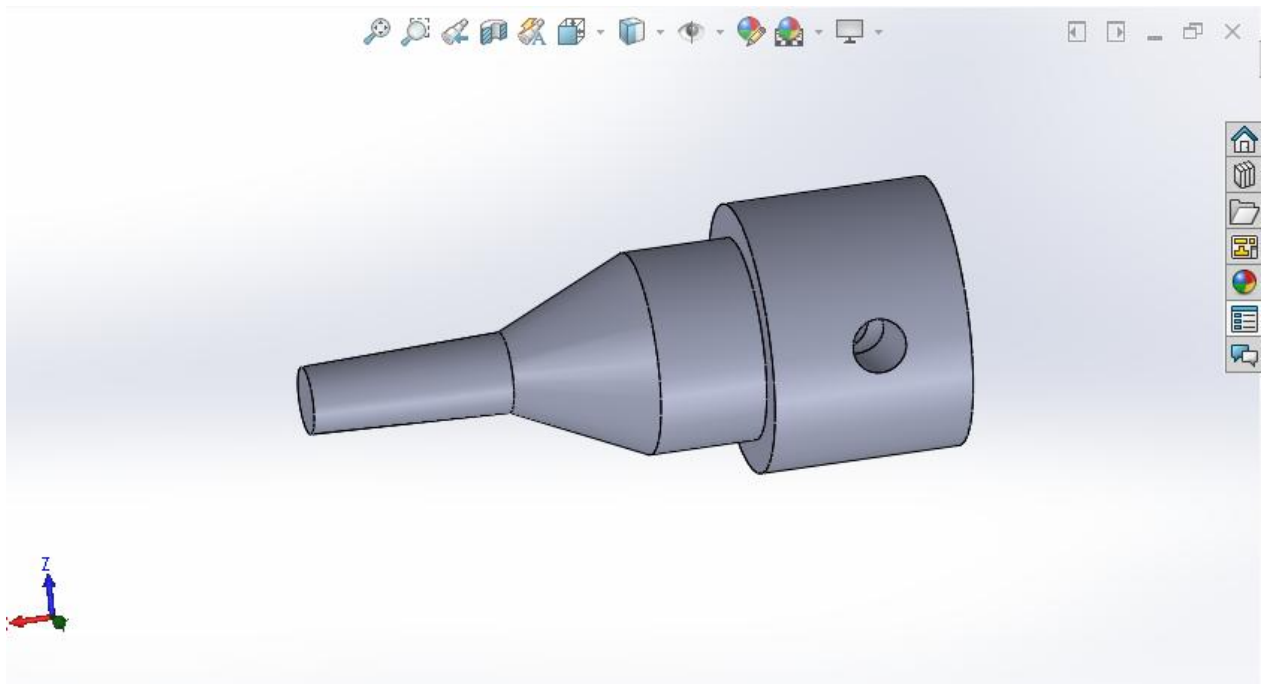
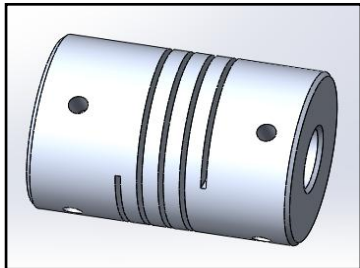


Figure III. 12: accouplement.

#### 2.4.2. Conception des pièces standard :

Le tableau suivant représente la conception des pièces standard et normalisé, leurs rôles, ainsi que leurs nombre.

Nom du Pièce	Nombre	Rôle	Figure
Accouplement	03	Accoupler l'arbre moteur avec les tiges filetées	

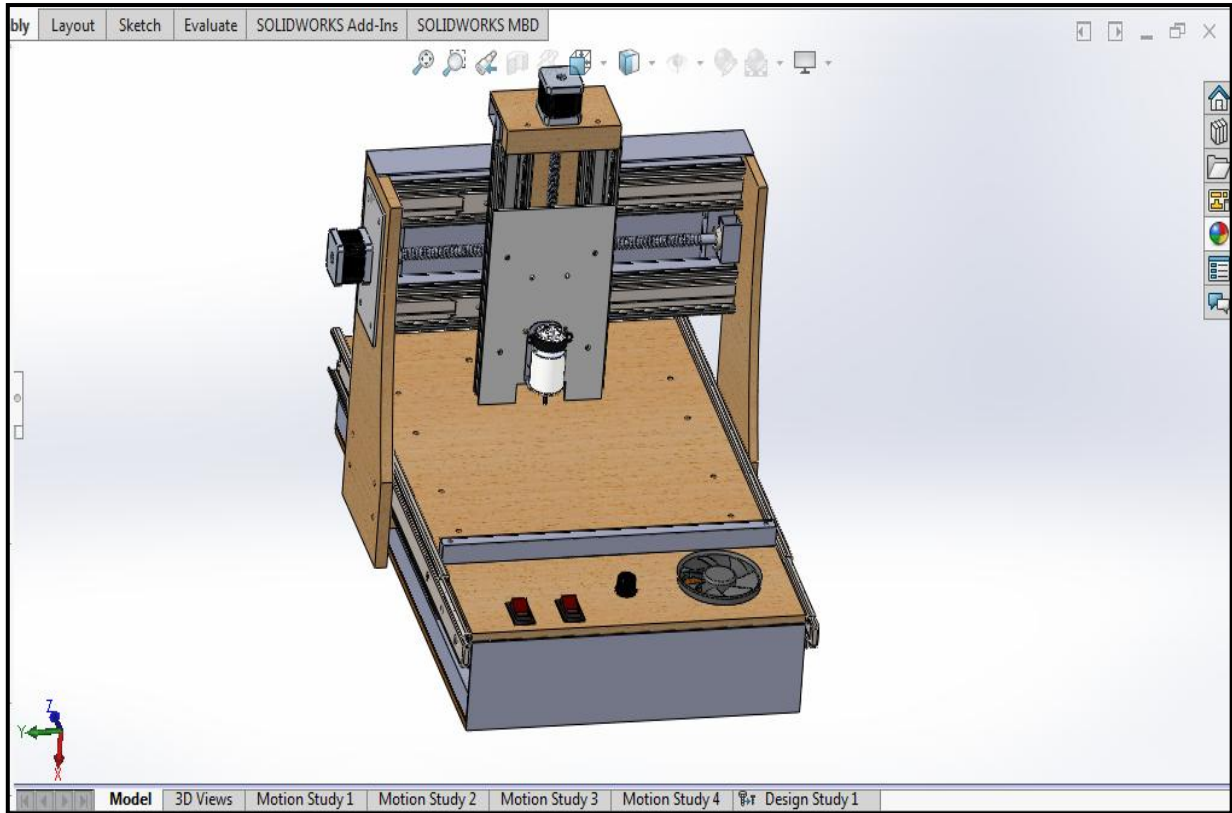
Tige fileté	03	Assurer le transmission de l'écrou	
Roulement	03	Assurer le guidage en rotation de tiges filetées	
Ecrou	03	Transformer le mouvement de rotation en mouvement de translation	
Guidage	06	Assurer le mouvement de translation sur les 3 axes	

**Tableau III. 1** :conception des pièces standards.

### 2.5. Assemblage de la machine CNC :

Après la conception des différentes pièces de la machine cnc, sont assemblé à l'aide de logiciel Solidworks.

L'assemblage des différentes pièces est représenté dans la Figure III.13 :



**Figure III. 13:** Assemblage des pieces.

### 2.6. Réalisation de la machine :

La première étape de réalisation consiste à usiné une partie des pièces suivant les plans crée auparavant, est la deuxième partie à les assemblé avec les pièces standards et normalisés.

Les figures suivantes représentent quelques étapes de réalisation de la machine.

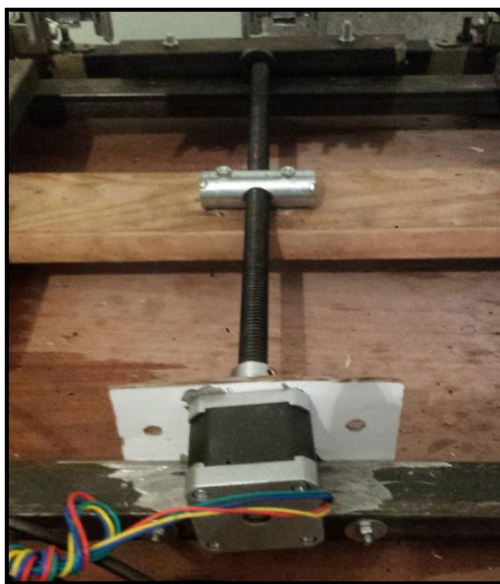




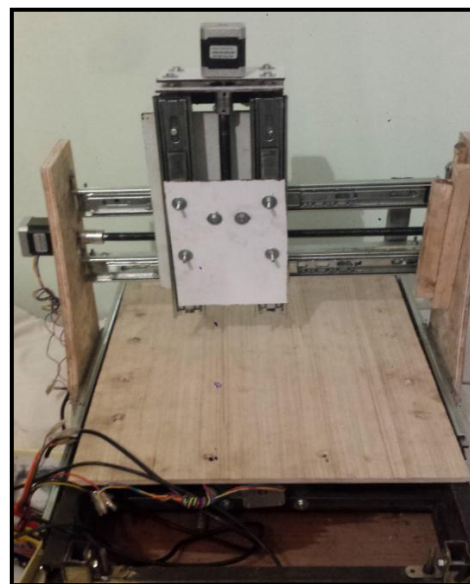
Assemblage l'axe Z .



assemblage de axe Z avec axe X.



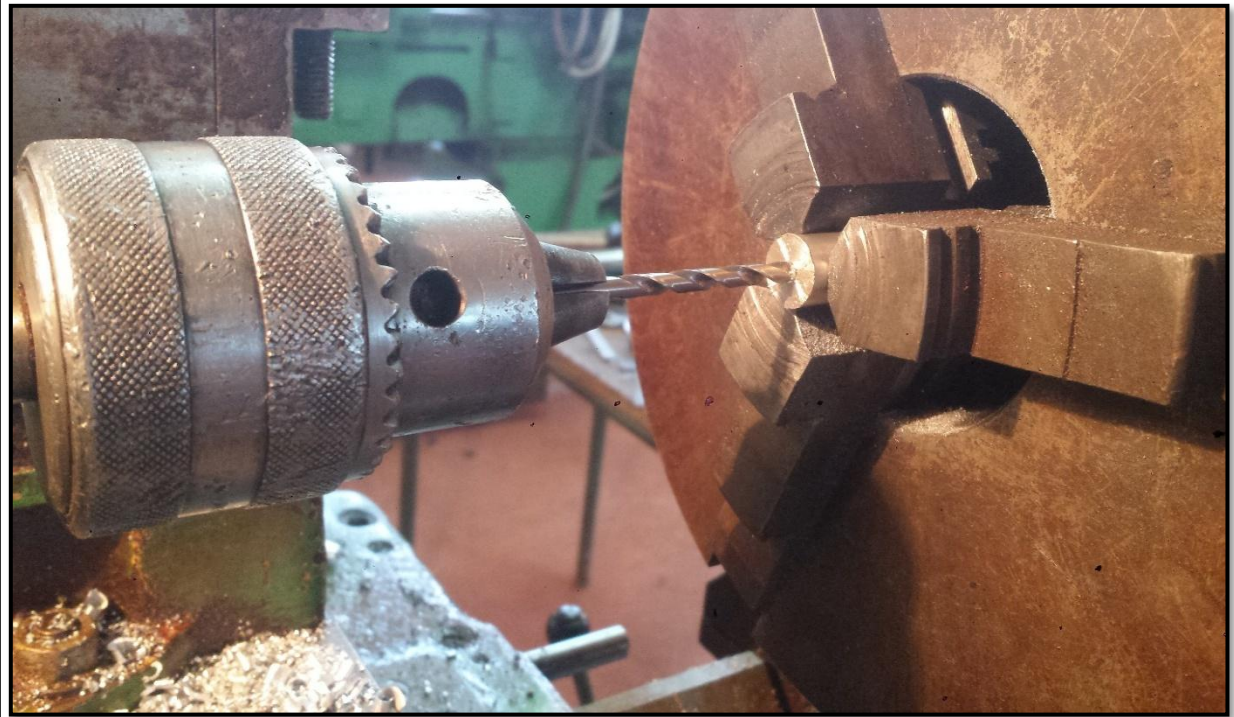
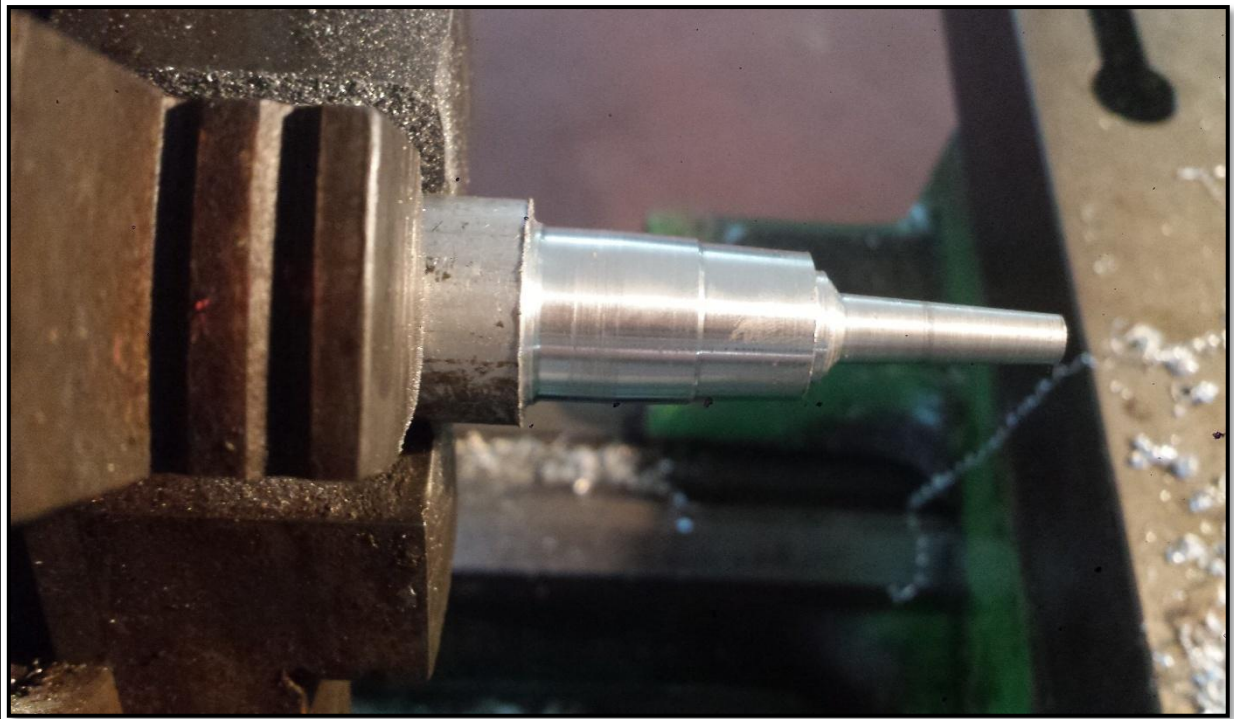
Assemblage de l'axe axe Y



assemblage des trois axes

Figure III. 14: Assemblage des axes de machine.





**Figure III. 15:** usinage de L'accouplement.

### **3. Partie électrique :**

#### **3.1. Description des éléments de la partie électrique :**

##### **3.1.1. Moteur pas à pas :**

Le moteur pas à pas constitue un convertisseur électromécanique destiné à transformer le signal électrique (impulsion ou train d'impulsions de pilotage) en déplacement (angulaire ou linéaire) mécanique. Voir Figure III.16.

On trouve trois types de moteurs pas à pas :

- Le moteur à réluctance variable.
- Le moteur à aimants permanents.
- Le moteur hybride.

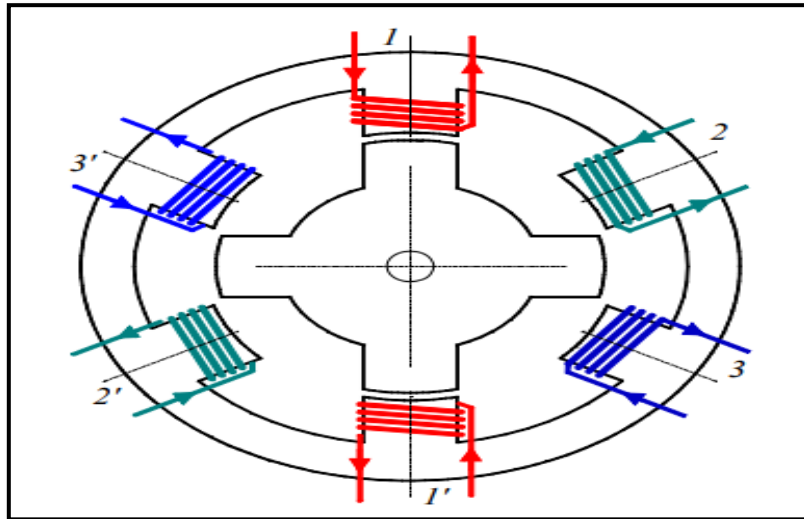


**Figure III. 16:** Moteur pas à pas.

##### **3.1.1.1. Les moteurs à réluctance variable :**

Les moteurs à réluctance variable fonctionnent selon un principe différent de celui des moteurs à aimant permanent. Ils possèdent bien évidemment un stator, mais ce dernier est fabriqué en acier doux non magnétique. Il n'est pas lisse et possède plusieurs dents. Le stator est composé de huit plots sur lesquels sont enroulés les bobinages, ce qui donne 4 phase. Le rotor, quant à lui, ne comporte que 6 dents.

Le principe de fonctionnement est très simple l'un des phases alimentant deux des plots opposés du stator est traversée par un courant afin d'aligner deux des dents du rotor avec ces plots. Le mode de commande peut dans ce cas, de la même façon que pour les autres moteurs, être monophasé, biphasé ou demi-pas [17] . Voir Figure III.17.

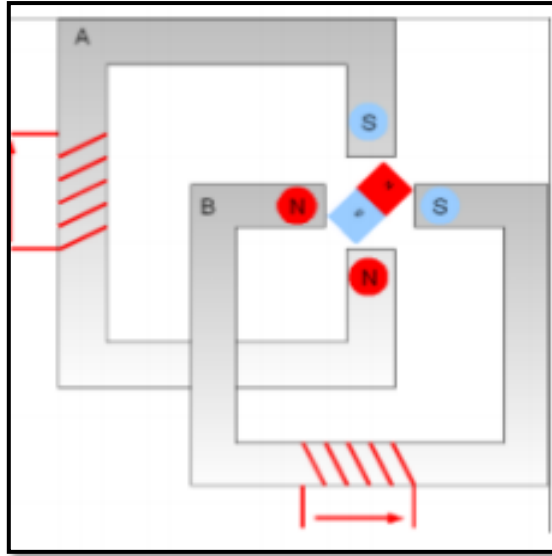


**Figure III. 17:** Moteur pas à pas à réluctance variable [17].

### 3.1.1.2. Les moteurs à aimant permanent :

Les moteurs à aimants permanent sont semblables aux moteurs à réluctance variable, sauf que le rotor possède des pôles NORD et SUD. A cause des aimants permanent, le rotor reste freiné à sa dernière position lorsque le bloc d'alimentation cesse de fournir des impulsions.

Le principe de fonctionnement est le plus simple. Le rotor est constitué d'un aimant permanent, et le stator comporte deux paires de bobines. En agissant sur les bobines alimentées, et le sens des courants, on fait varier le champ créé par le stator. A chaque pas, la direction du champ induit par le stator tourne de 90°. L'aimant permanent suit le déplacement du champ magnétique créé par les bobines et s'oriente selon une de ses quatre positions stables. Comme le rotor est aimanté, lorsque le moteur n'est pas alimenté le flux magnétique dû à l'aimant permanent crée un couple résiduel en se plaçant dans l'axe de l'une des bobines [18] . Voir Figure III.18.



**Figure III. 18:** Moteur pas à pas à aimant permanent [18] .

#### 3.1.1.3. Les moteurs hybrides :

C'est des moteurs qui superpose le principe de fonctionnement des moteurs à aimant permanent et à réluctance variable et combine leurs avantages. Le rotor est constitué de deux disques dentés décalés mécaniquement. Entre ces deux disques est inséré un aimant permanent. Leur intérêt réside dans un meilleur couple, une vitesse plus élevée, une résolution de 100 à 400 pas/tour, et sont plus chers [19] .

Dans ce type de moteurs, les bobines sont alimentées alternativement, dans un sens puis dans l'autre. Dans la Figure III.19, on voit bien l'intérêt d'avoir un rotor polarisé : quand on coupe l'alimentation de la bobine verte et qu'on alimente la bobine rose, en l'absence de polarisation du rotor on n'aurait aucun contrôle sur le sens de rotation, les deux dents bleues et rouges étant attirés de la même façon par la bobine. Avec un rotor polarisé, on peut choisir une de ces deux dents en agissant sur le sens du courant dans la bobine [20] .

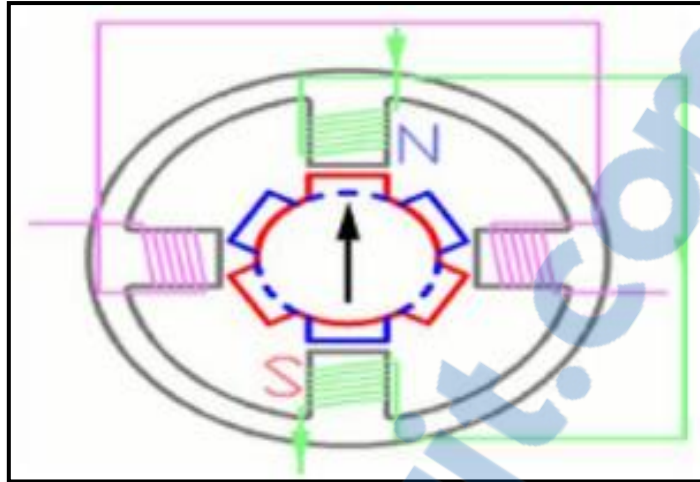


Figure III. 19: moteur pas à pas hybride [18].

Pour assuré le bon fonctionnement de la machine j'ai utilisé des moteurs pas à pas NEMA 17 sont les moteurs les plus approprié à la machine de gravure, c'est un moteur hybride bipolaire avec un couple beaucoup plus élevé.

### 3.1.2. Carte Arduino :

La carte Arduino Figure III.20 ,est une carte électronique basée autour d'un microcontrôleur et de composants minimum pour réaliser des fonctions plus ou moins évoluées à bas coût. Elle possède une interface USB pour la programmer.

Arduino peut être utilisé pour développer des applications matérielles industrielles légères ou des objets interactifs, et il peut recevoir en entrées une très grande variété de capteurs. Les projets Arduino peuvent être autonomes, ou communiquer avec des logiciels sur un ordinateur.

Il existe différent type et modèle d'Arduino, allant du Nano au Mega, avec différents caractéristiques, comme le nombre de pins, la mémoire interne et les fonctionnalités prédéfinie.

### 3.1.3. Driver moteur pas à pas A4988:

Le A4988 est un pilote de micropas permettant de contrôler les moteurs pas à pas bipolaires, doté d'un traducteur intégré pour une utilisation facile. Cela signifie que nous pouvons contrôler le moteur pas à pas avec seulement 2 broches de notre contrôleur une broche pour la direction et une pour la vitesse. elle peut être installée sur une carte mini Shield.

La Figure III.21 represent un exemple de driver moteur pas a pas A4988 :



#### 3.1.4. La carte SHIELD CNC :

Le cnc shield est une carte qui se connecte à la carte Arduino Uno. Elle fut créée spécialement pour les machines à découpe numérique (CNC). C'est la carte d'interface qui distribue la puissance à l'aide des pilotes driver A4988. Elle va commander les moteurs pas à pas sur les axes X, Y, Z + A, ainsi que la commande rotation. Elle permet également de traiter les signaux du refroidissement, ainsi que des capteurs de fin de courses mini et maxi. Cette interface peut être pilotée facilement car compatible avec GRBL sur la carte contrôleur Arduino Uno.

La Figure III.20 représente une carte shield :

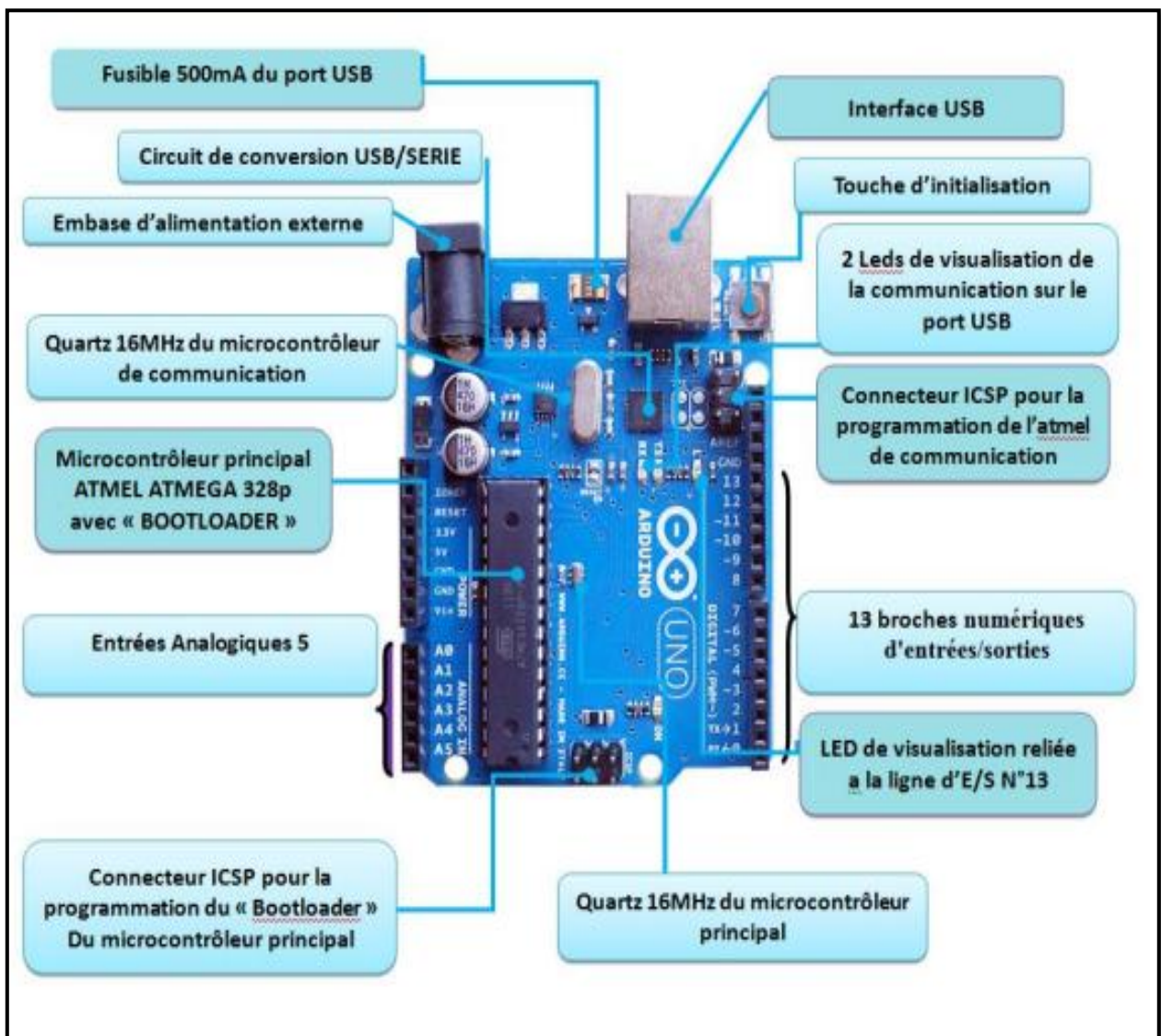


Figure III. 20 : carte Arduino UNO.

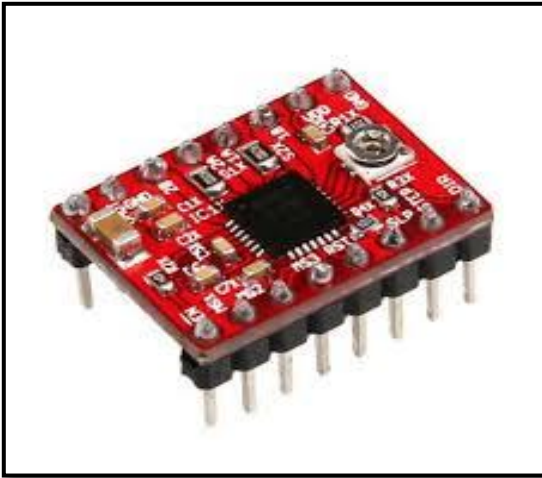


Figure III. 21: A4988.

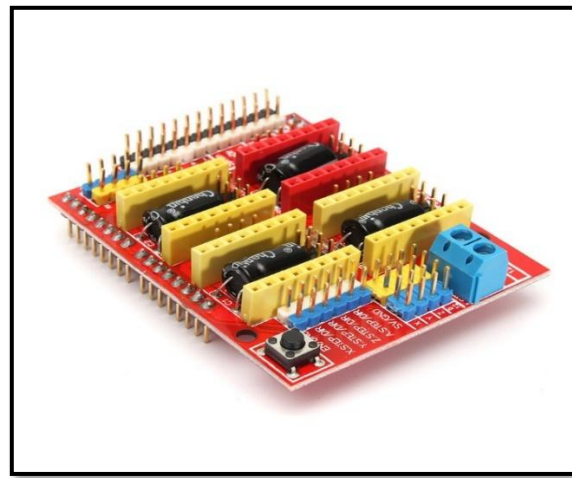


Figure III. 22: La carte SHIELD.

L'assemblage de A4988 et la carte SHIELD avec la carte arduino est représenté dans la Figure III.23 suivante :

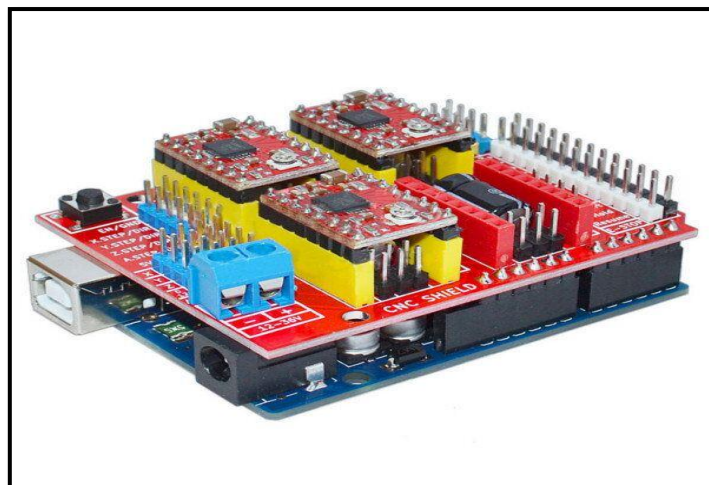


Figure III. 23: assemblage des carte.

Pour assurer le fonctionnement de nos cartes électroniques, nous avons besoin d'une alimentation continue de 5VDC et 12VDC.

### 3.2. Schéma de câblage électrique global :

Le schéma de câblage électrique global est représenté dans la Figure III.24 :



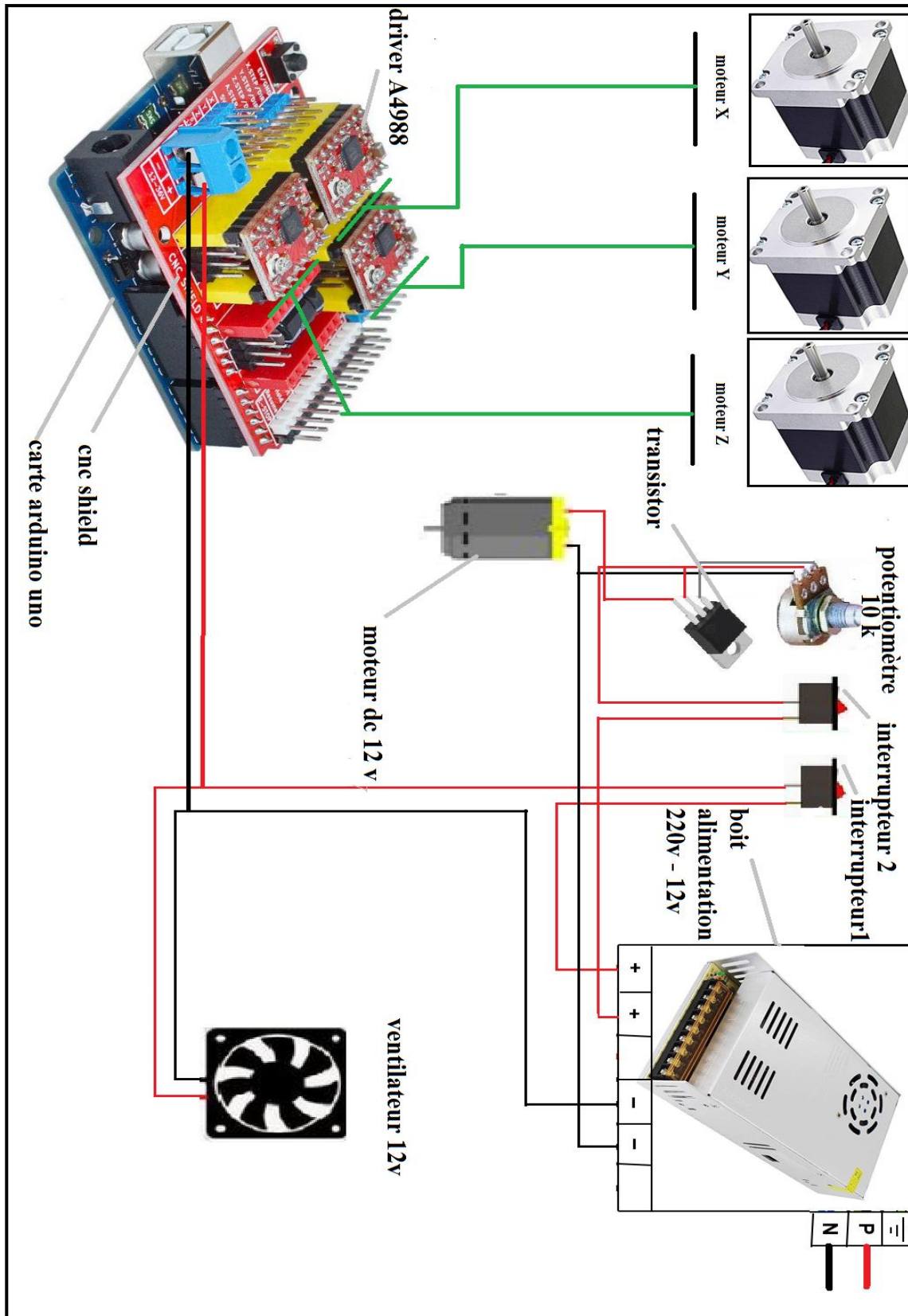
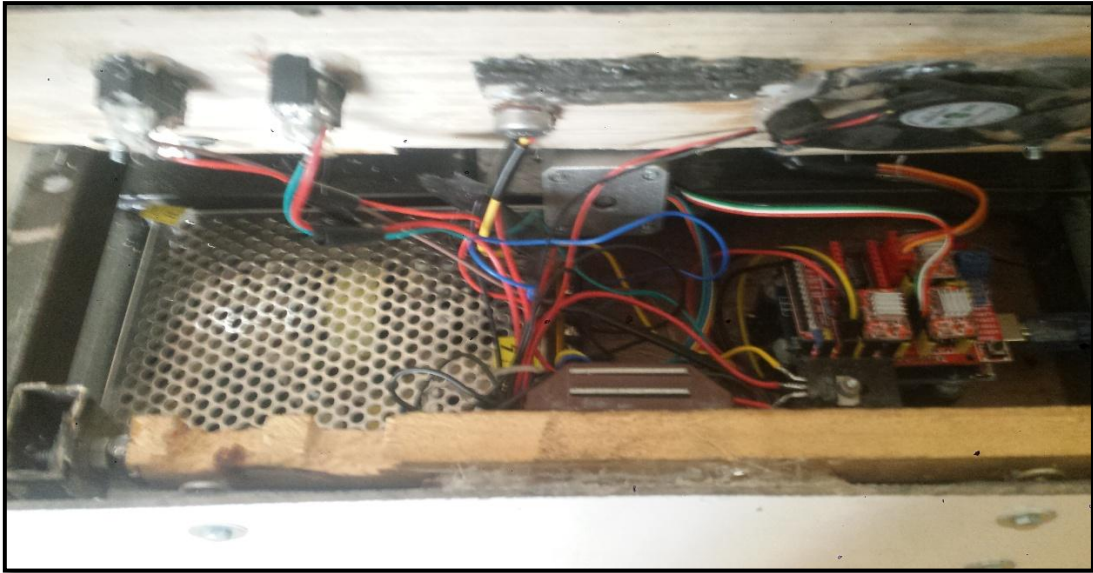


Figure III. 24:Schéma de câblage électrique global.



La Figure III.25 représente la réalisation du Schéma électrique :

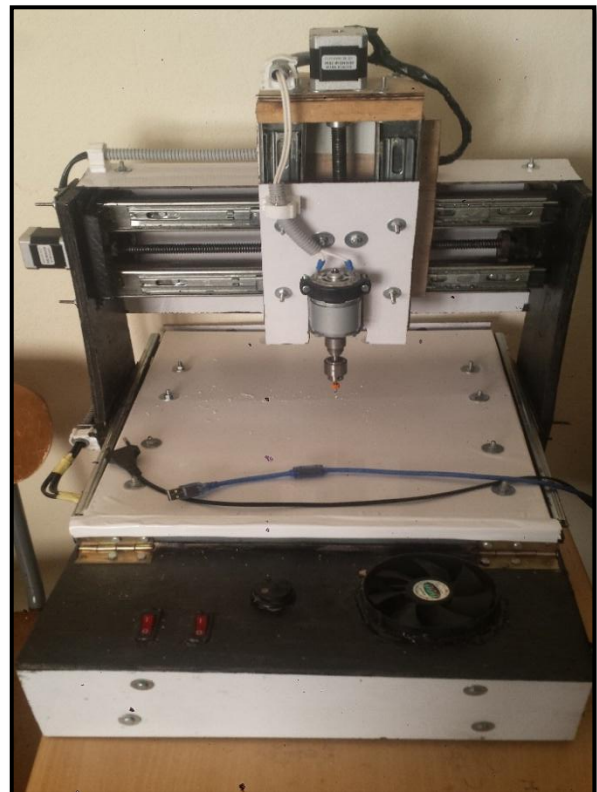


**Figure III. 25:** réalisation du Schéma électrique.

#### **4. Réalisation finale de la machine :**

La dernière partie de notre réalisation est d'assembler les deux parties mécanique et électrique pour assurer le bon fonctionnement de la machine.

La Figure III.26 représente l'assemblage de la partie mécanique avec la partie électrique.



**Figure III. 26:** Réalisation finale de la machine.

# *Chapitre IV: Programmation Et*

---

## *Interface Graphique*

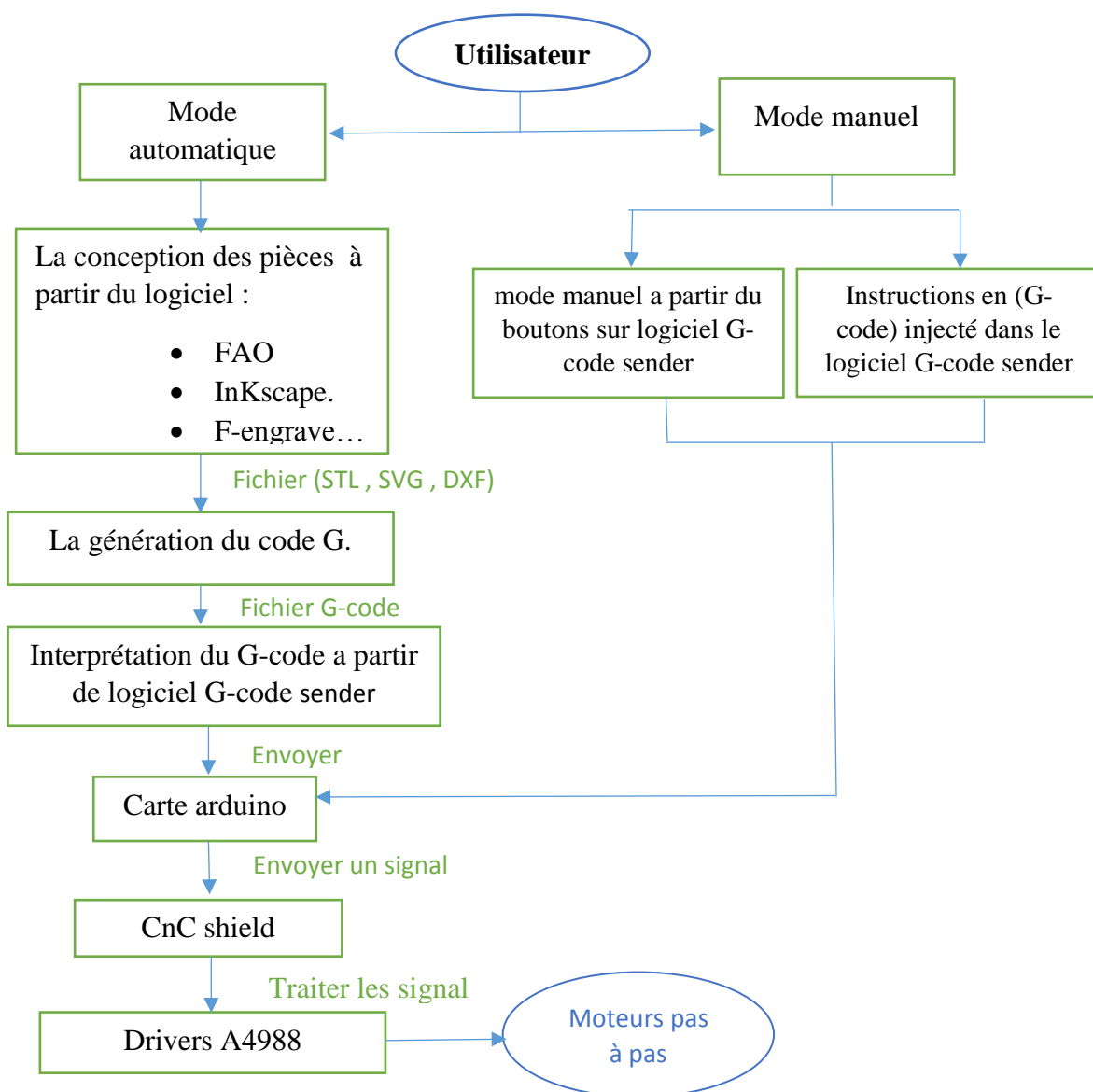
---

## 1. Introduction:

Les machines-outils à commande numérique sont complètement pilotées par ordinateur. Pour que la machine comprenne les instructions données par l'ordinateur de contrôle, il faut que ces instructions soient écrites dans un langage de programmation spécial, dans ce chapitre on présente les logiciels et le langage utilisés pour commander la machine.

## 2. chaîne de programmation :

la figure IV.1 représente les différentes étapes et modes de programmation de la machine depuis le début jusqu'à l'opération d'usinage.



**Figure IV . 1:** chaîne de programmation.

Il est également possible de graver du texte ou des images, par exemple par la génération de G-code de ces fichiers par des logiciels tels que Inkscape, F-Engrave...

Après la génération d'un fichier G-code, il reste à l'interpréter de façon à pouvoir contrôler les moteurs avec un microcontrôleur plus précisément avec une carte Arduino. Pour cela il existe des logiciels et des micro-logiciels spécialement conçus pour cela, tel que le Grbl.

### 3. Description des programmes utilisés :

#### 3.1. G-Code :

Le G-code est le langage de programmation pour contrôler une machine à commande numérique, normalisé par ISO (Organisation internationale de normalisation). Il est basé sur des lignes de code, plusieurs de ces lignes peuvent être regroupées dans un fichier pour créer un programme G-code, qui sert à programmer les mouvements que la machine va effectuer (droite, arc de cercle, etc). Il est à noter que le G-code est utilisé pour des fraiseuses à commande numérique, des tours, des imprimantes 3D et des lasers de découpe [21].

##### 3.1.1. Les principales fonctions du G-code :

Les principales fonctions du G-code sont résumées dans le tableau IV.1 suivant.

<b>G00</b>	Déplacement rapide
<b>G01</b>	Interpolation linéaire
<b>G02</b>	Interpolation circulaire (sens horaire)
<b>G03</b>	Interpolation circulaire (sens anti-horaire)
<b>G04</b>	Arrêt programme et ouverture carter (pour nettoyer) (temporisation - suivi de l'argument F ou X en secondes)
<b>G10/G11</b>	Écriture de données/Effacement de données
<b>G17</b>	Sélection du plan X-Y
<b>G18</b>	Sélection du plan X-Z
<b>G19</b>	Sélection du plan Y-Z
<b>G20</b>	Programmation en pouces
<b>G21</b>	Programmation en mm
<b>G28</b>	Retour à la position d'origine

<b>G31</b>	Saute la fonction (utilisé pour les capteurs et les mesures de longueur d'outil)
<b>G33</b>	Filetage à pas constant
<b>G34</b>	Filetage à pas variable
<b>G40</b>	Pas de compensation de rayon d'outil
<b>G41</b>	Compensation de rayon d'outil à gauche
<b>G42</b>	Compensation de rayon d'outil à droite
<b>G90</b>	Déplacements en coordonnées absolues
<b>G91</b>	Déplacements en coordonnées relatives
<b>G94/G95</b>	Déplacement en Pouces par minute/Pouce par tour
<b>G96/G97</b>	Vitesse de coupe constante (vitesse de surface constante)/Vitesse de rotation constante ou annulation de G96.
<b>M00/M01</b>	Arrêt du programme, arrêt optionnel ou avec condition
<b>M06</b>	Changement d'outil
<b>M30</b>	Fin du programme, réinitialisation, rembobinage

Tableau IV. 1: Les principales fonctions du G-code.

### 3.2. Logiciel arduino :

Arduino est un espace de développement intégré (EDI) qui permet de d'écrire, de compiler et d'envoyer du code sur le circuit imprimé du même nom. Pour rappel, la carte Arduino contient un microcontrôleur que l'on peut programmer dans le but d'effectuer des tâches variées, comme la domotique, par exemple.

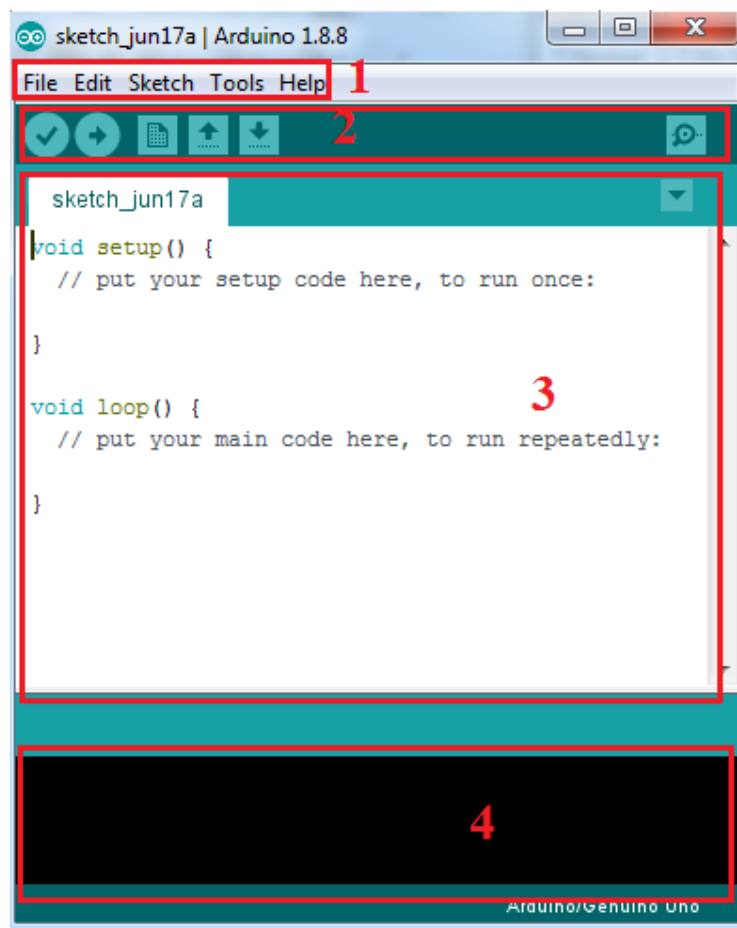
Grâce à arduino on est en mesure de communiquer et transférer des données facilement au circuit imprimé. Après l'installation du programme, il est noté que l'interface du logiciel se présente de manière simple et structurée. Outre les traditionnelles barres d'outils et de boutons, on retrouve une fenêtre d'édition depuis laquelle on rédige le code des programmes. Supportant plusieurs onglets, l'éditeur d'Arduino permet de travailler sur plusieurs programmations à la fois. Sous la fenêtre d'édition, une zone de message indique les actions en cours. Enfin, une console de texte affiche les informations concernant les résultats de compilation des programmes (Voir Figure IV . 2).

Enfin, après avoir rédigé vos programmes dans l'environnement dédié, vous pouvez vérifier et compiler votre code source, puis l'envoyer à votre carte dans le cas où aucune erreur de programmation ne serait détectée par Arduino.

Logiciel II est totalement gratuit et proposé en libre téléchargement sur le site Internet d'Arduino [23].

### 3.2.1. Présentation de logiciel :

La figure IV.2, représente la fenêtre principale de logiciel.

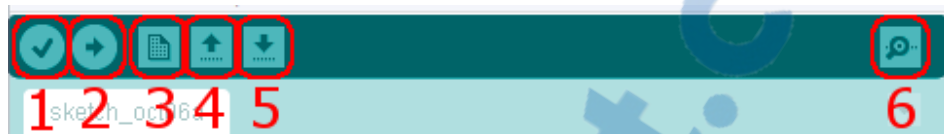


**Figure IV . 2:** Composants de logiciel.

- Le cadre numéro 1 : ce sont les options de configuration du logiciel
- Le cadre numéro 2 : il contient les boutons qui vont nous servir lorsque l'on va programmer nos cartes.

- Le cadre numéro 3 : ce bloc va contenir le programme que nous allons créer
- Le cadre numéro 4 : celui-ci est important, car il va nous aider à corriger les fautes dans notre programme. C'est le débogueur.

➤ Présentation des boutons du cadre numéro 2, voir figure IV.3



**Figure IV . 3:** Présentation des boutons

- Bouton 1 : Ce bouton permet de vérifier le programme, il actionne un module qui cherche les erreurs dans votre programme.
- Bouton 2 : Charge (téléverse) le programme dans la carte Arduino.
- Bouton 3 : Crée un nouveau fichier.
- Bouton 4 : Ouvrir un fichier.
- Bouton 5 : Enregistrer le fichier.
- Bouton 6 : Ouvrir le moniteur série.

### **3.3. GRBL :**

Le Grbl est un micro-logiciel libre installé sur la carte Arduino qui fera l'interface entre les instructions en G-Code envoyées à la machine et le pilotage des moteurs pas à pas en fonctions de ces instructions. Pour dire simplement, GRBL est le centre de contrôle pilotant avec précision le mouvement des moteurs pas à pas de la machine en envoyant à haute fréquence un flot continu de pulsions électriques en faisant de petits incréments qui effectivement déplacent l'outil [23].

#### **3.3.1. Installation GRBL dans la carte ARDUINO :**

- Tout d'abord télécharger GRBL.
- Copiez le dossier décompressé dans: \Documents\Arduino\libraries
- Une fois terminé, redémarrer Arduino.
- Rendez-vous ensuite dans fichiers -> exemples -> grbl -> grblUpload, voir figure IV. 4.

- Une fois le sketch ouvert, téléchargez-le sur votre carte Arduino Uno par un clique sur la bouton qui est on cercle rouge . voir la figureIV.4.

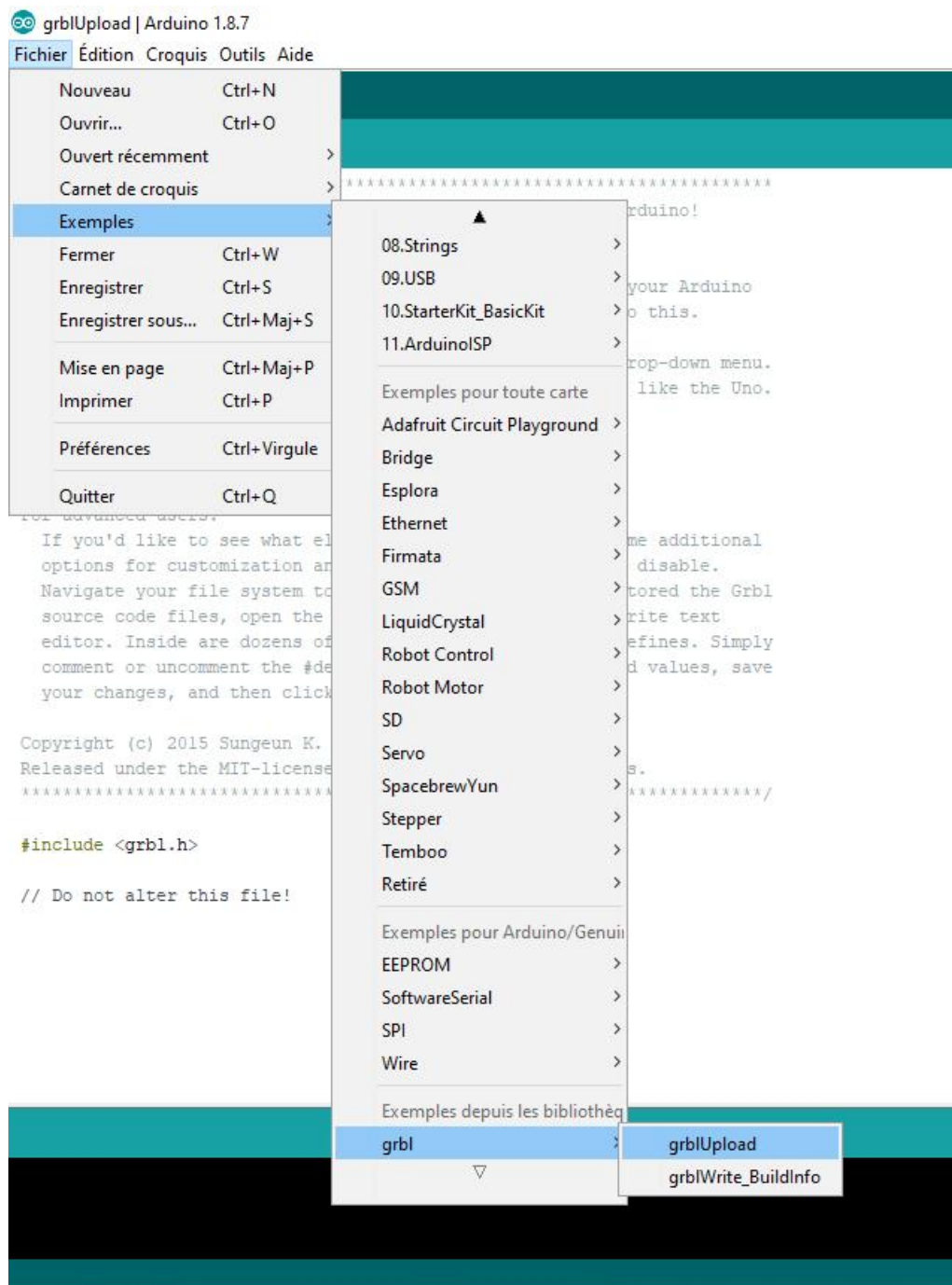
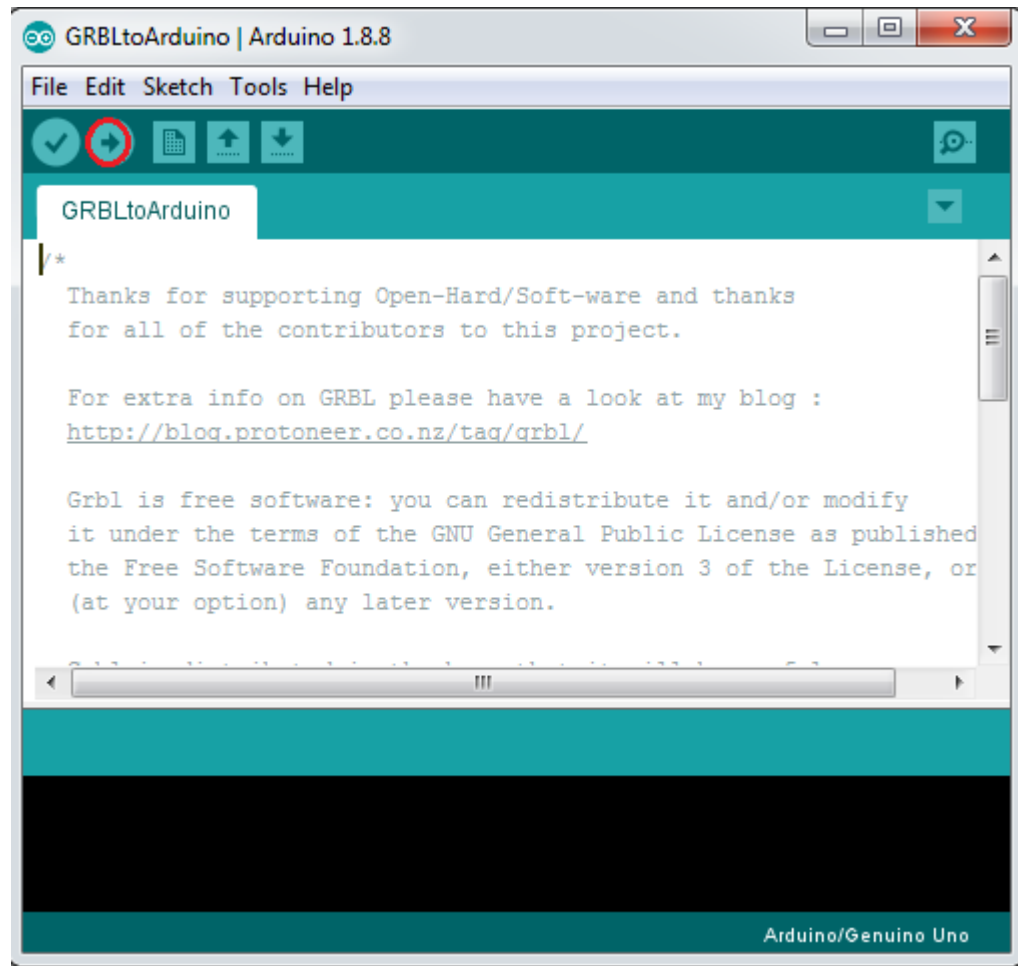


Figure IV . 4: 1ere étape de l'installation.





**Figure IV . 5:** 2eme étape de l'installation.

### 3.4. Universal G-Code Sender :

C'est logiciel qui fera l'interface avec ordinateur et qui permettra d'envoyer le G-Code à la carte Arduino qui lui même sera interprété par GRBL.

Une fois installé, vous devrez aller dans « Settings » -> « Firmware Setting » et sélectionner « GRBL ». Ainsi le logiciel saura comment piloter la carte Arduino [24].

Il y'a deux modes utilisée dans ce programme soit mode manuel ou mode automatique.

- Les deux cadres en rouge représente le mode manuel de logiciel G-code sender.voir figure IV.6.
- Le cadre en verre représente le mode automatique de logiciel G-code sender.voir figure IV.7.

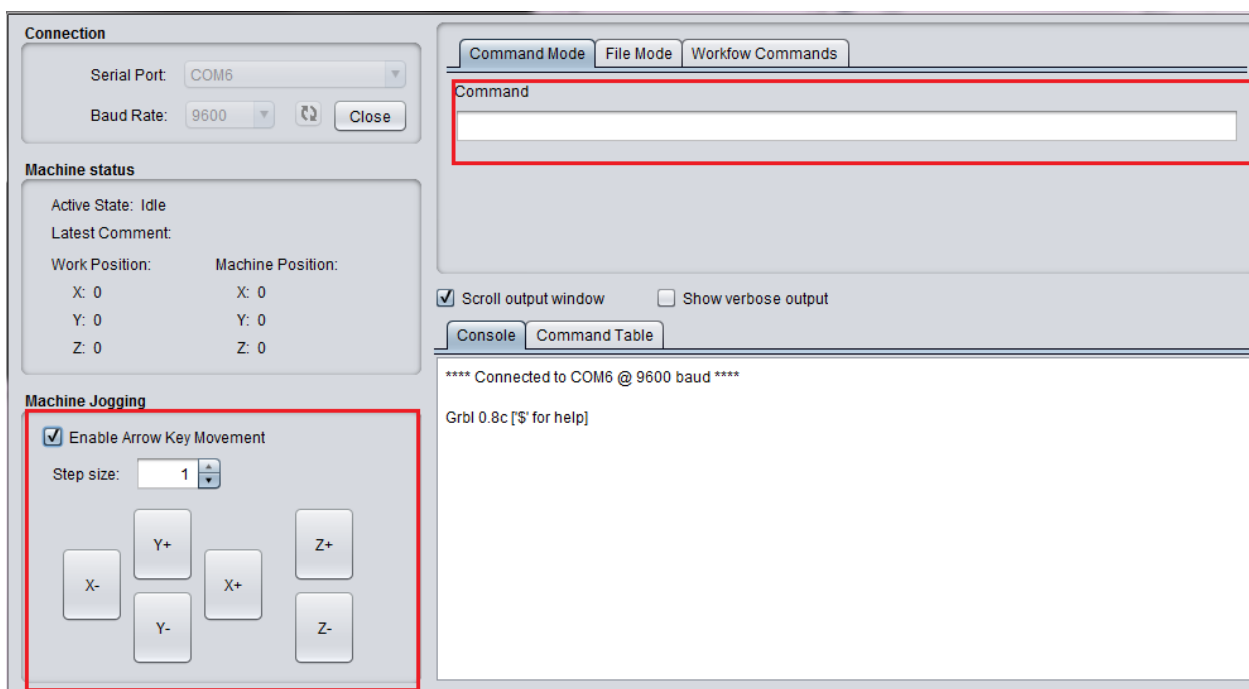


Figure IV . 6: mode manuel.

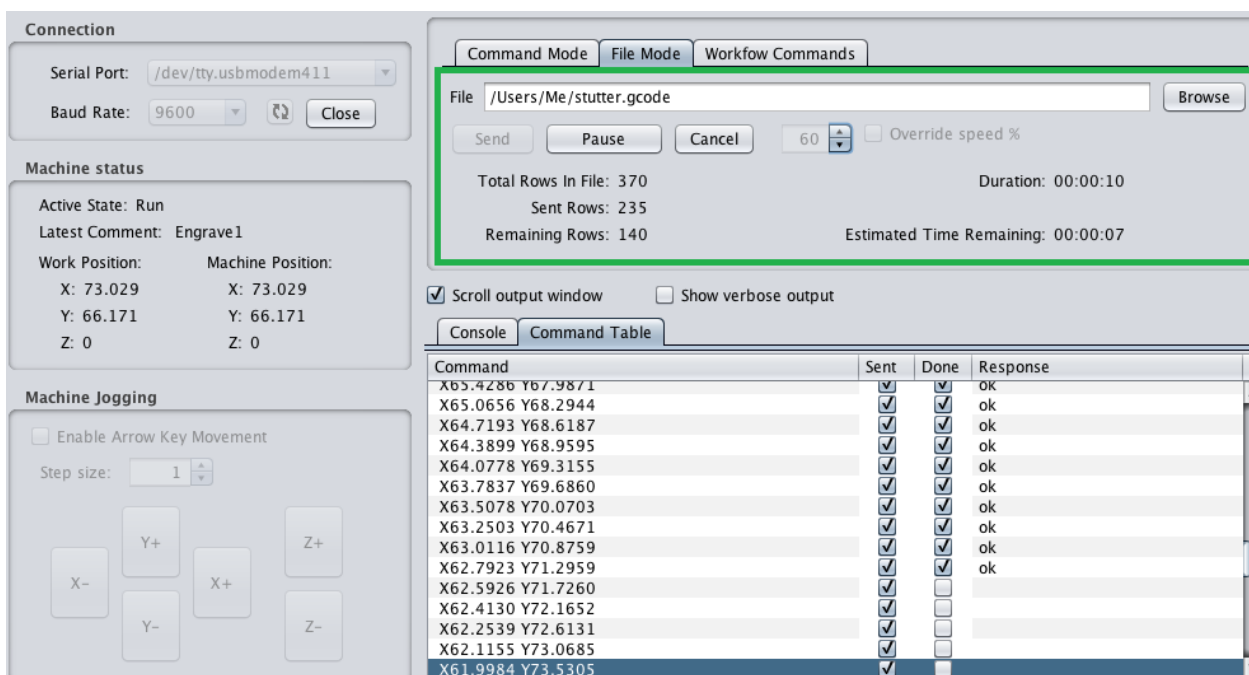
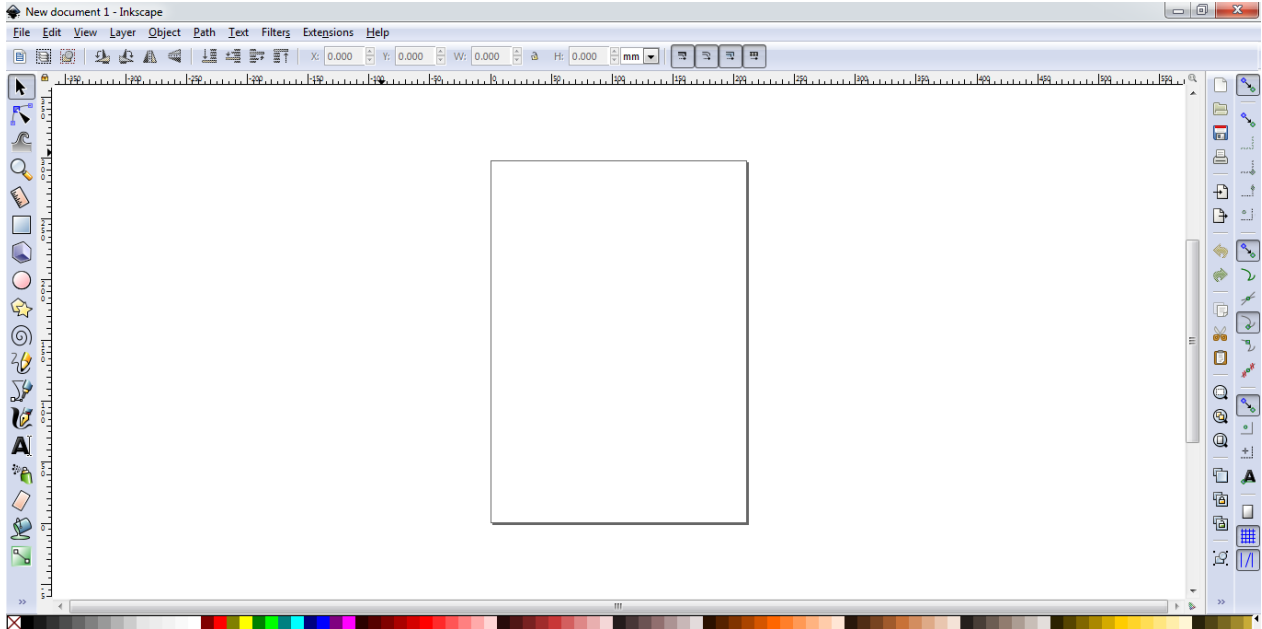


Figure IV . 7: Mode automatique.

### 3.5. Inkscape :

Inkscape est un logiciel libre, d'édition de graphismes vectoriels, Il permet de créer des graphismes de manière très précise et contient également de nombreux effets. le dessin est enregistré sous forme d'équations de courbes (chemins).

La figure IV.8 représente l'interface de logiciel Inkscape.



**Figure IV .8:** interface de logiciel inkscape.

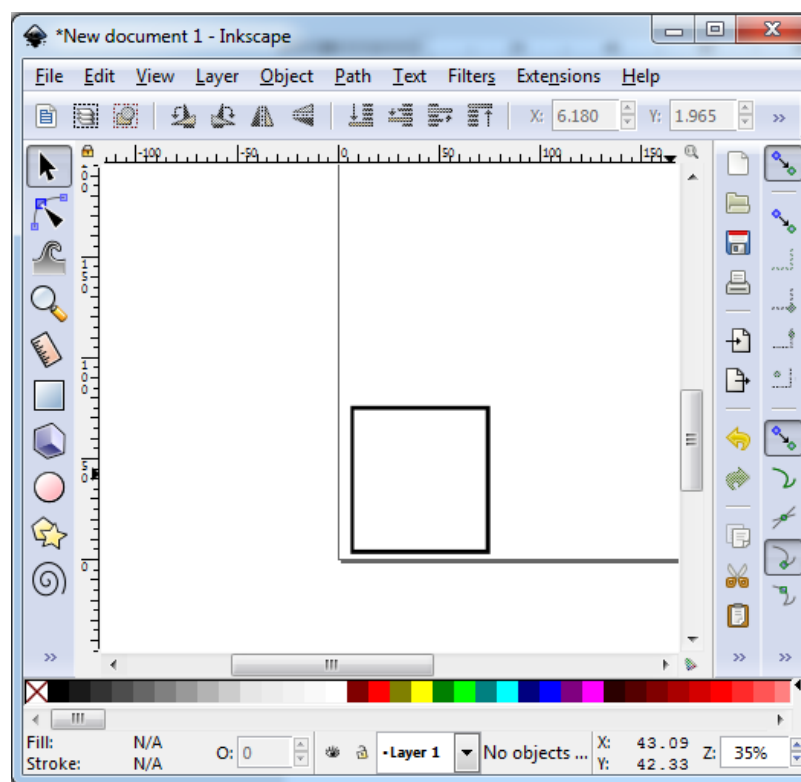
"G-code tools" est une extension de Inkscape permettant (entre autre) de générer du G-code à partir des chemins d'une image vectorielle.

### 4. Mise en marche de la machine :

Pour tester de la machine on suit les étapes suivantes:

- Création du fichier G-code de la pièce à graver, avec le logiciel Inkscape qui permet de générer un fichier G-code. la forme a gravé sur une plaque en forex est un rectangle.

La figure IV.9 représente exemple de la gravure qui on veut la graver.



**Figure IV .9:** exemple à graver

la figure IV.10 représente le fichier gcode qui est obtenu a l'aid de logiciel inkscape.

```
File Edit Format View Help
G90
G21
G17 G64 P0.001 M3 S3000
F100.0
G0 Z0
G0 X0 Y0.000
G1 Z-10
G1 X-40
G1 Y-40
G1 X0
G1 Y0
G0 Z10
M5
M2
```

**Figure IV . 10:** G-code de la pièce à graver.

- Brancher L'arduino à l'ordinateur via un port USB.
- Configurer et téléverser le programme Grbl dans l'Arduino via port USB.
- Configurer l'interface de logiciel G-code sender . Choix de (port USB, la vitesse ...).
- Initialiser les axes au point zéro manuellement.
- Importer le fichier G-code de la pièce à graver dans l'interface de commande de logiciel g-code sender.
- Mise sous tension de la boîte d'alimentation.
- Allumage de la broche.
- Envoi du fichier G-code et lancement de l'usinage.

### **4.1. Résultat obtenue :**

La figure IV.11 représente le début de la gravure.



**Figure IV . 31:** debut de la gravure .

La figure IV.12 représente la fin de la gravure .



**Figure IV . 12:** Fin de la gravure et dégagement de l'outil.

# Conclusion générale

## 1. Généralités

L'objectif de ce projet de fin d'étude c'est de réaliser une machine CNC à 3 axes, on a commencé par la rédaction de cahier de charge pour bien définir le projet et pour pouvoir faire les meilleurs choix des solutions technologiques, cela est suivi d'une conception des différentes composantes opérationnelle et non opérationnelle, ensuite la réalisation. Est on a terminé par la programmation avec un essai sur une plaque.

La machine CNC réalisée peut servir comme outils pédagogique, et permettre aux étudiants d'approfondir leurs connaissances en ce qui concerne les machines CNC par :

- La découverte d'un système automatisé ;
- L'initiation à la programmation d'une machine robotisée ;
- La réalisation de gravures des perçages sur des plaques ;

## 2. Perspectives

En perspectives,

- Cette machine peut être améliorée par l'utilisation de moteur pas à pas avec un couple plus élevée.
- Remplacer la broche par une plus puissante ;
- Remplacement de guidage par un autre plus précis ;
- Améliorer la rigidité de la machine par le remplacement des pièces de châssis par d'autres en aluminium ou en acier.
- La conception de cette machine peut servir comme base pour construire une machine plus puissante et plus précise qui peut usiner ou graver sur tout type de matériaux.

- [1] MW NAOUAR, É MONMASSON, IS BELKHODJA... - 2009 - techniques-ingenieur.fr.
- [2] Gilles PROD'HOMME, 1995, commande numérique des machines-outils, Techniques de l'ingénieur, Génie mécanique, Usinage, B7 130.
- [3] MICHELE LE BOUTEILLER, la MOCN ou Machin Outils à commande numérique, (premier partie), 10janvier 1996.
- [4] Gilles prud'homme, « commande numérique des machines-outils »Technique de l'ingénieur, génie mécanique, usinage, B7130, D. Duret, « simulation de gamme d'usinage », revue de l'ingénieur et du Technicien de l'enseignement technique, n°229,1981, pp. 34-37, 1995.
- [5] AV Bondarev, PV Kiryukhantsev-Korneev... - Materials & Design, 2016 - Elsevier
- [6] BELLOUFI Abderrahim, «Machines-outils à commande numérique», Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2010.  
<https://elearn.univ-ouargla.dz/2013-2014/courses/MOCN/.../CHAPITREIV.pdf>
- [7] D. Gelin, M. Vincent « éléments des fabrications », Edition marketing, paris, Mars 1995.
- [8] A. CHEIKH, La programmation des machines-outils à commande numérique, cours de 3ème année GMP, département de génie mécanique, 2009/2010.
- [9] M Al-Ahmad - 2008 - pastel.archives-ouvertes.fr .
- [10] H. Marchat, La gestion de projet par étapes : analyse des besoins, Eyrolles (2006).
- [11] M BEHAR, I MAHMOUDI - dspace.univ-tlemcen.dz.
- [12] H. Chen, Design of a controlled environment agricultural plant inspection robot, Master of Science in Industrial Engineering, Graduate College of The University of Iowa, May 2012.
- [13] François Hennebelle , Typologie et conception des machines à mesurer tridimensionnelles: un état de l'art , 17 International Congress of Metrology, 1 002 , EDP Sciences, 2015.

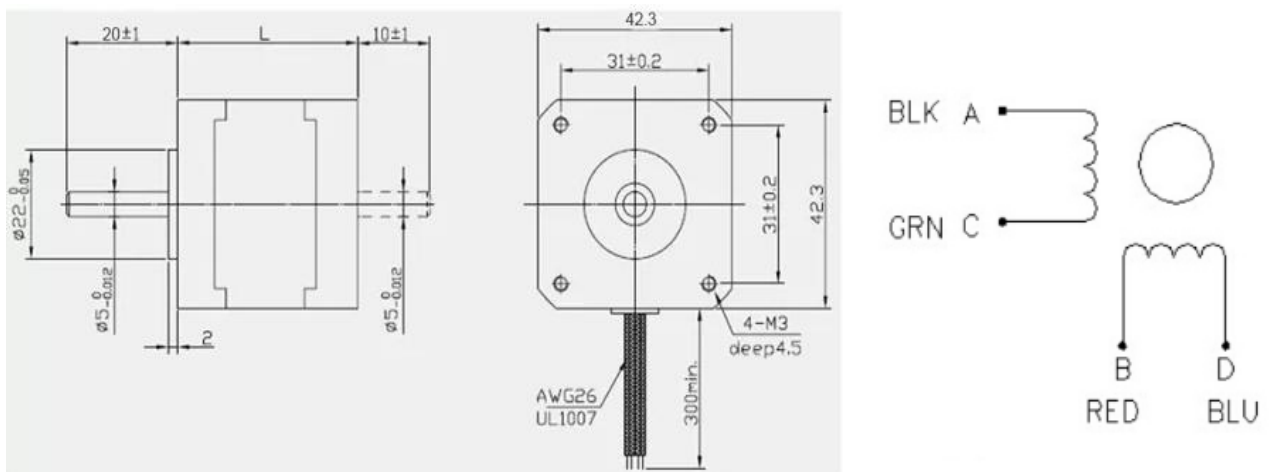


## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [14] Manuelle, guidage et entraînement linéaires, MICHAUD CHAILLY.
- [15] Patrick BLAIN, technique de l'ingénieur (CAO et méthodologie de conception). Document B 2 810.
- [16] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fabrication\\_assist%C3%A9e\\_par\\_ordinateur](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fabrication_assist%C3%A9e_par_ordinateur)
- [17] Takashi Kenjo and Akira Sugawara, «stepping motors and their microprocessor controls » Oxford University Press, ISBN 0-19-859385-6.
- [18] <http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/electri/pasapas.html>
- [19] <http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/electri/pasapas.html>
- [20] Copyright, Moteur industrie. Tous droits réservés, Moteur industrie 33 rue Paul Gauguin 31100 Toulouse, 27/01/2016.
- [21] R Laguionie - 2007 - tel.archives-ouvertes.fr.
- [22] [https://www.academia.edu/30770971/rapportde\\_stage\\_ETIPRIM\\_Arduino](https://www.academia.edu/30770971/rapportde_stage_ETIPRIM_Arduino)
- [23] [https://zestedesavoir.com/tutoriels/686/arduino-premiers-pas-en-informatique-embarquee/742\\_decouverte-de-larduino/3416\\_le-logiciel/](https://zestedesavoir.com/tutoriels/686/arduino-premiers-pas-en-informatique-embarquee/742_decouverte-de-larduino/3416_le-logiciel/)
- [24] <https://blog.bendinelli.net/index.php?post/2016/02/06transformer-une-d%C3%A9coupeuse-laser-avec-arduino-et-Grbl>
- [25] <http://www.wiki.coworking-aurillac.fr/arduino-cnc-pas-a-pas-de-realisation-avec-la-carte-protoneer/>

# ANNEXE

y

**Annexe -A- : Moteur pas à pas nema 17****Moteur pas à pas jmk****Dimensions (mm)**

Numéro de modèle:	JK42HS40-1704
Angle de pas	1,8 °
Dimensions:	42 mm * 42 mm * 40 mm
Résistance	1,65 $\Omega$
augmentation de la température	Max 80°C
température ambiante	-20 °C ~ + 50 °C
force radiale Max	28N
essieu Force	10N
Poids du moteur	280g

**Caractéristique du moteur.**

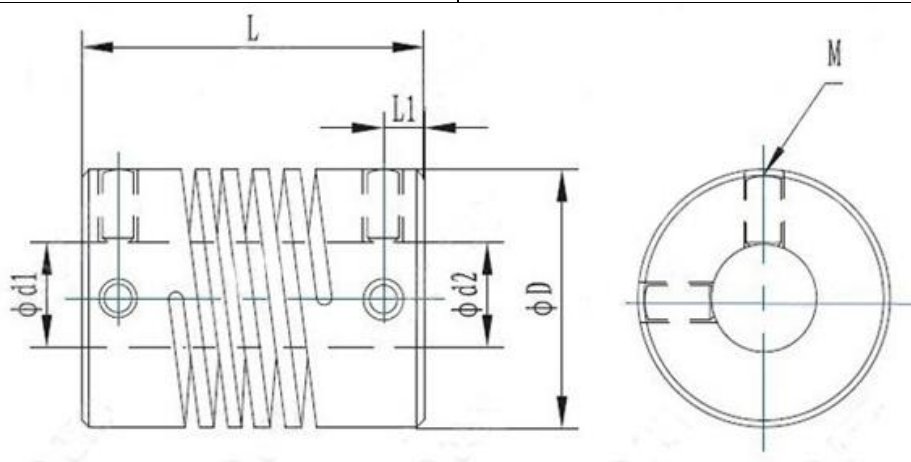
**Le prix : 2,600.00DA**

### Annexe-B- : Accouplement



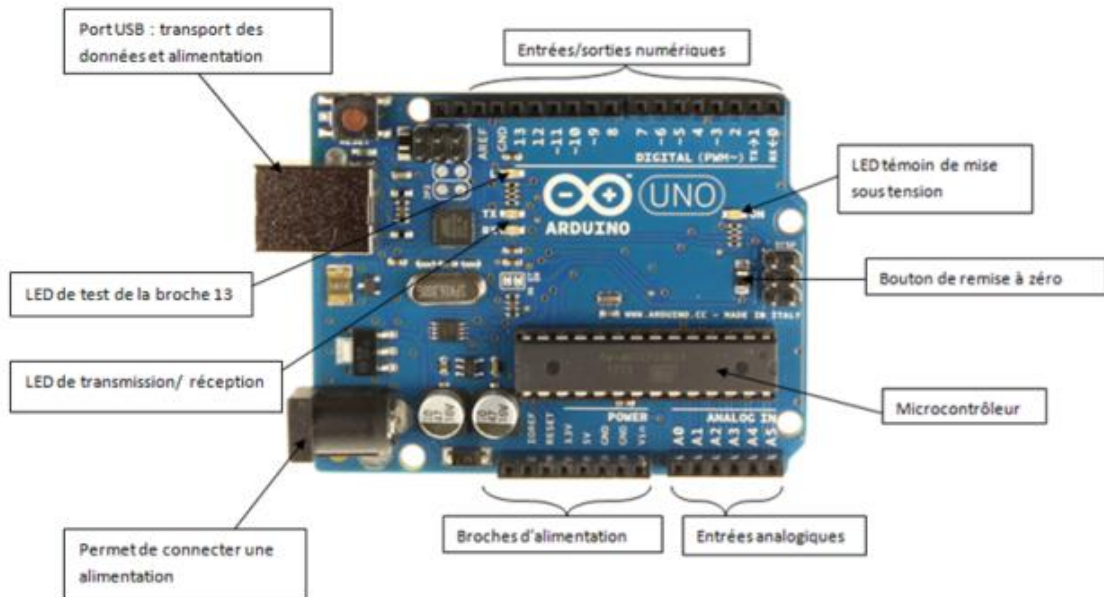
**Accouplement flexible**

T Modèle	Arbre flexible d'accouplement
matériaux	Aluminium
Couleur	Argent
Dimensions	L = 25 mm
	d1 = 6 mm
	d2 = 8 mm
	D = 19 mm



**Le prix : 400.00DA**

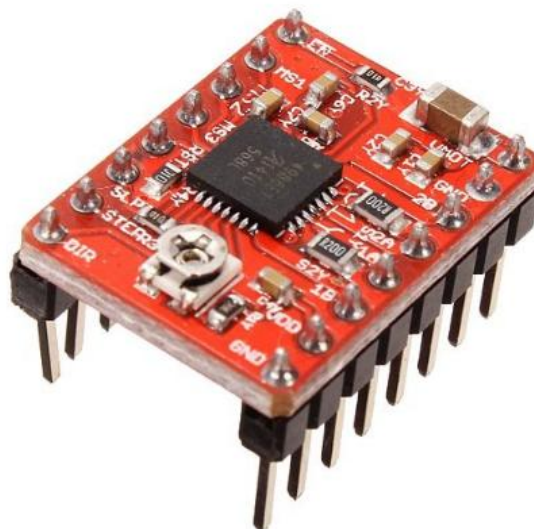
### Annexe-C- :carte Arduino



Carte arduino uno

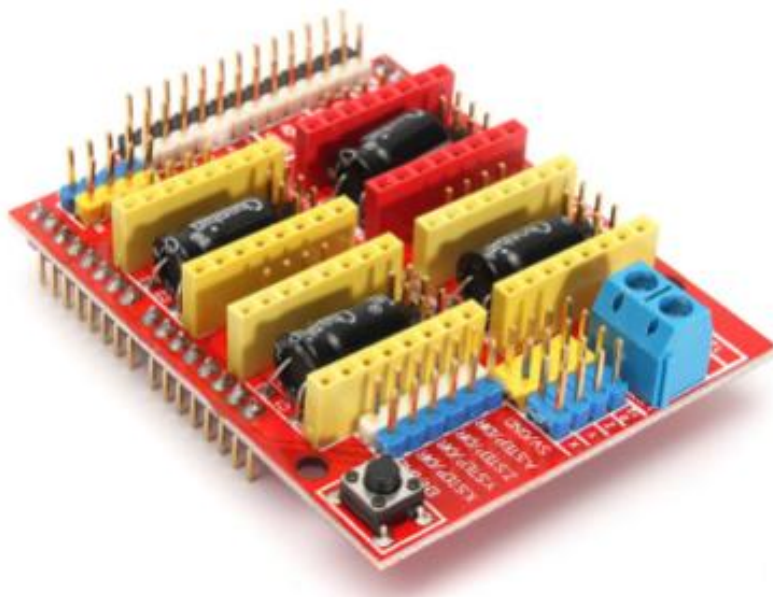
Modèle	Arduino UNO R3 ATmega16U2 AVR
Type alimentation	port USB
Tension d'alimentation	5V
microprocesseur	ATMega328
RAM statique (SRAM)	2 kB
mémoire flash	32 kB
EEPROM	1 kB
Vitesse d' horloge	16 MHz
Dimensions	D=53 mm
	L=68 mm
	H=10mm

**Le prix : 2,600.00DA**

**Annexe-D- : Driver A4988**

Modèle	Driver A4988
Tension de fonctionnement minimum	8 V
Tension maximale de fonctionnement	35 V
Courant par phase (en continu)	1,2 A
Courant maximum par phase	2.3 A
Logique de contrôle	Tension minimale: 3 V
	Tension Maximale : 5.5 V
Résolution Microstep	Pas complet, 1/2, 1/4, 1/8 et 1/16 de pas
Dimensions	D=5 mm
	L=5 mm
	H=0.9 mm

**Le prix : 600.00DA**

**Annexe-E- : CNC shield****CNC shield V3**

Modèle	CNC shield V3
Puissance	12-36V
Tension de fonctionnement	8 à 35 volts
Courant maximum par bobine	2A
Intensité	2 A
Support pour 4 axes	(X, Y, Z, A)
Fonction micro-step	jusqu'à 1/16 de pas
Dimensions	D=53 mm
	L=68 mm
	H=18 mm

**Le prix : 1,400.00DA**

**Annexe-F- : moteur DC**

Modèle	775
Tension nominale	12V DC (12-24V)
Vitesse de charge	12V 4000 rpm 24V 8000 rpm
Puissance	100W
Diamètre de l'arbre	5 mm
Longueur de l'arbre	17mm
La longueur du corps	67mm
Avant les étapes de diamètre	17,5 mm
Ancien haut niveau	4,5 mm
Diamètre du corps	42 mm
Longueur moteur	98 mm
pas d'installation en diagonale	29mm
Taille du trou de montage	M4
Trou de montage	2

**Le prix : 4,000.00DA**



## Annexe-G-: potentiomètre



### G.1 Description :

Un **potentiomètre** (appelé familièrement potard) est un type de résistance variable à trois bornes, dont une est reliée à un curseur se déplaçant sur une piste résistante terminée par les deux autres bornes.

### G.2 Caractéristiques :

puissance	0.5 W
Résistance	10 K

**Le prix : 100.00DA**

## Annexe-H-:transistor



### H.1 Description :

Le **transistor** est un composant électronique qui est utilisé dans la plupart des circuits électroniques (circuits logiques, amplificateur, stabilisateur de tension, modulation de signal, etc. ) aussi bien en basse qu'en haute tension.

**Le prix : 50.00DA**

### Annexe-I- : Alimentation



matériaux	Aluminium
Couleur	argent
Tension d'entrée	110 V - 220 V
Puissance de sortie	24W / 75W
Courant de sortie	2A / 3A

**Le prix : 5,000.00DA**

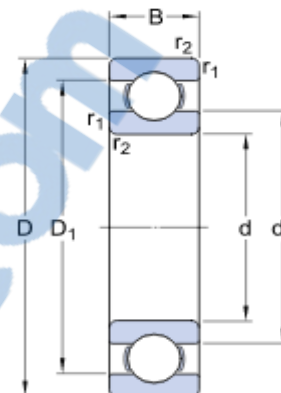
### Annexe-J-: Roulement rigides à billes



Domaine d'application : environnements encrassés

Caractéristiques : roulements à billes à une rangée

d	8
D	16
B	4



**Le prix : 100.00DA**

Rapport-gratuit.com  
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

### Annexe-K-: vis-écrou

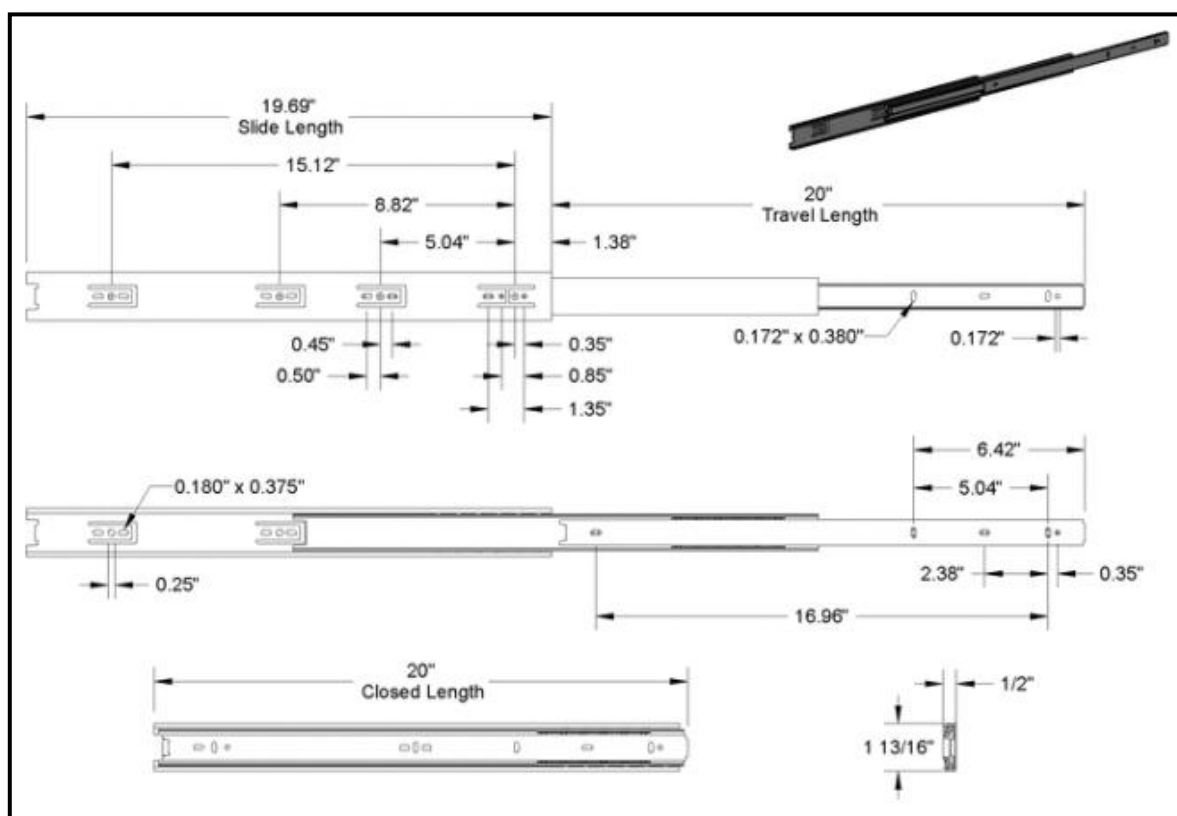


système vis écrou de cric

Type de filetage	filetage carré
nombre de filet	1
Diamètre de vis	11 mm
Pas	2.5 mm
Longueur	450 mm

**Le prix : 1,200.00DA**

## Annexe-L-: glissière télescopique



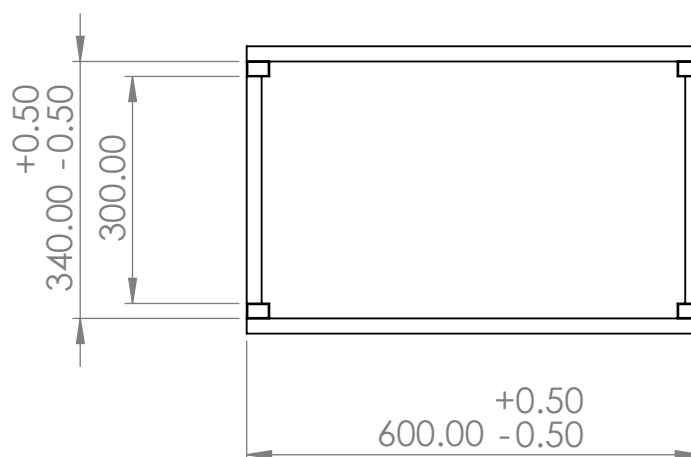
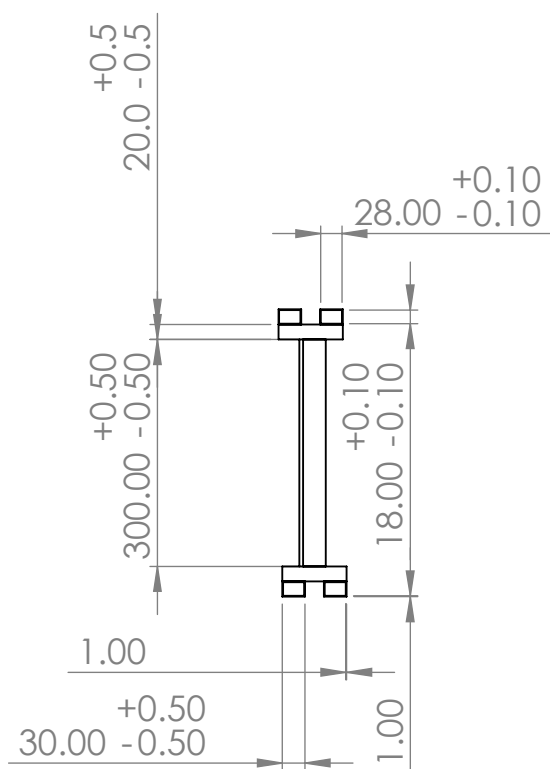
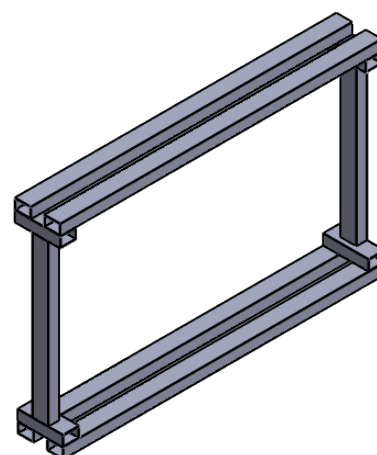
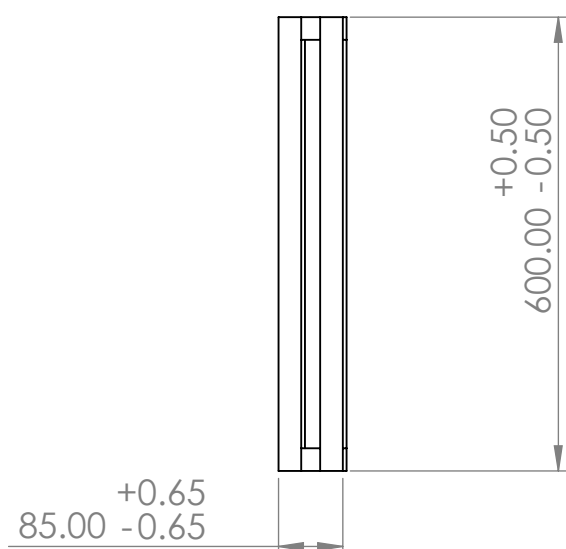
**Le prix : 300.00DA**

## Annexe-M-: G code

G00	Déplacement rapide
G01	Interpolation linéaire
G02	Interpolation circulaire (sens horaire, anti-trigo)
G03	Interpolation circulaire (sens anti-horaire, trigo)
G04	Arrêt programme et ouverture carter (pour nettoyer) (temporisation - suivi de l'argument F ou X en secondes)
G10/G11	Écriture de données / Effacement de données (suivi de l'argument L suivant le type de données à écrire)
G17	Sélection du plan X-Y
G18	Sélection du plan X-Z
G19	Sélection du plan Y-Z
G20	Programmation en pouces
G21	Programmation en mm
G28	Retour à la position d'origine
G31	Saute la fonction (mode <i>Interrupt</i> utilisé pour les capteurs et les mesures pièces et de longueur d'outil)
G33	Filetage à pas constant
G34	Filetage à pas variable
G40	Pas de compensation de rayon d'outil
G41	Compensation de rayon d'outil à gauche
G42	Compensation de rayon d'outil à droite
G54 à G59	Activation du décalage d'origine pièce ( <i>Offset</i> )
G68 / G68.1	Activation du mode "Plan incliné" ( <i>Tilted plane working</i> ) pour les centres d'usinage 5 axes
G70	Cycle de finition
G71 / G71.7	Cycle d'ébauche suivant l'axe Z (appel de profil balisé entre les arguments P et Q)
G75	Cycle de gorge
G76 / G76.7	Cycle de filetage
G83	Cycle de perçage déburrage
G69	Annulation du mode <i>Tilted plane working</i> (Plan incliné)
G84	Cycle de taraudage rigide
G90	Déplacements en coordonnées absolues
G91	Déplacements en coordonnées relatives
G94/G95	Déplacement en pouces par minute/pouce par tour
G96 ; G97	Vitesse de coupe constante (vitesse de surface constante) ; Vitesse de rotation constante ou annulation de G96

# Les mises en plans

# Les mises en plans



**Université A.B.B CM Département Génie Mécanique**

Format	A4
Echelle	1:10
Date	Mai 2019

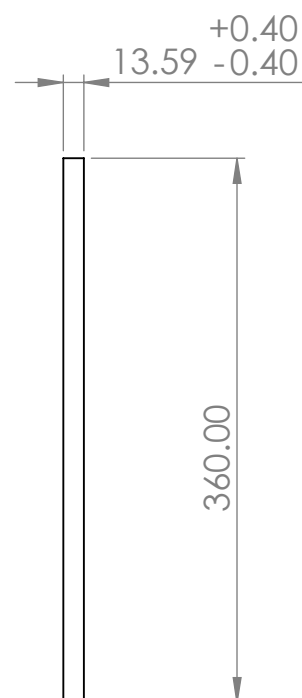
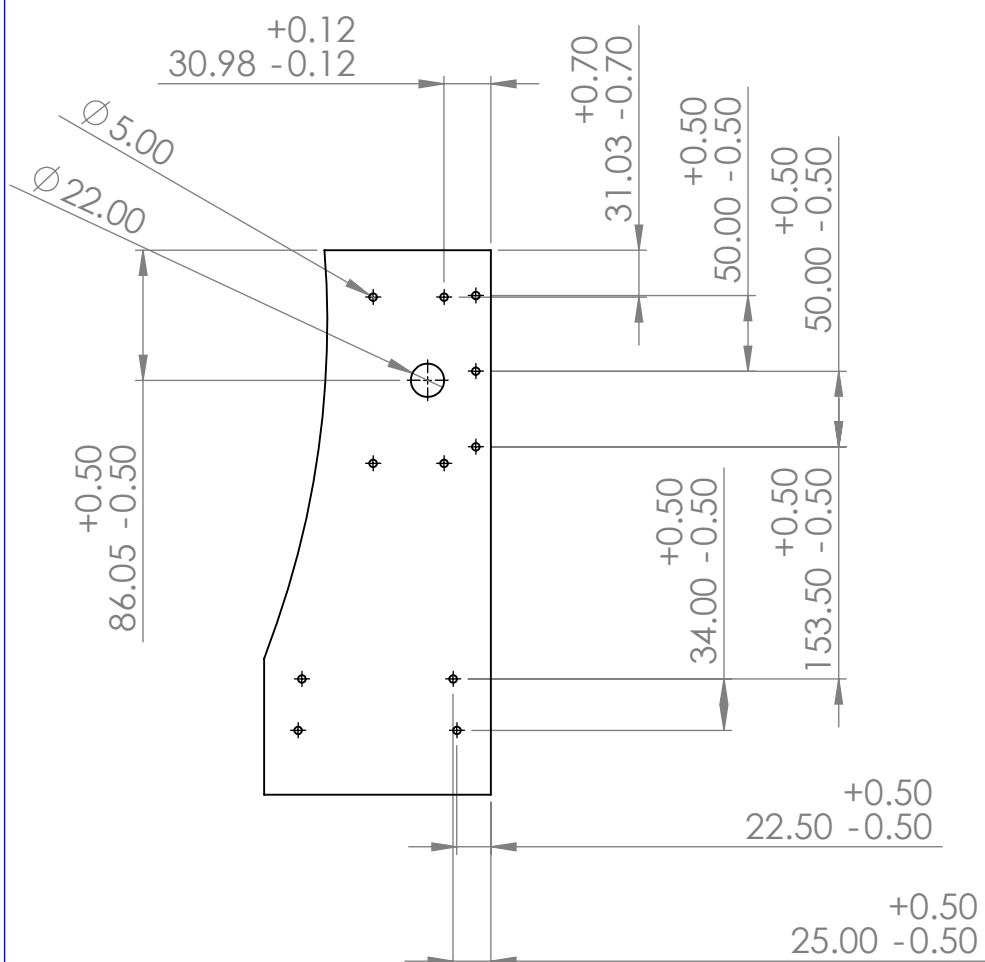
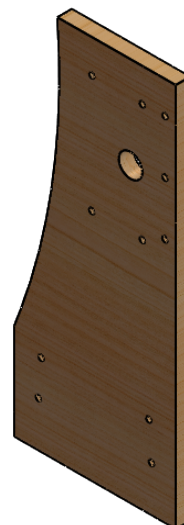
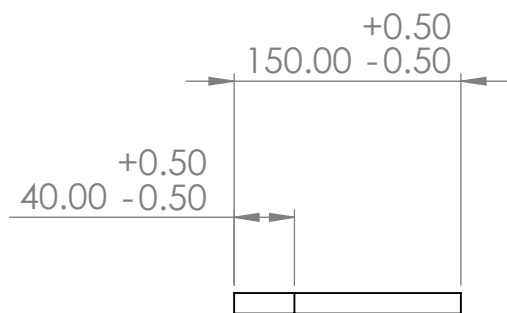
Titre :

**support axe Y.**

Réparer Par :

Bouyahia Yessine





**Université A.B.B CM Département Génie Mécanique**

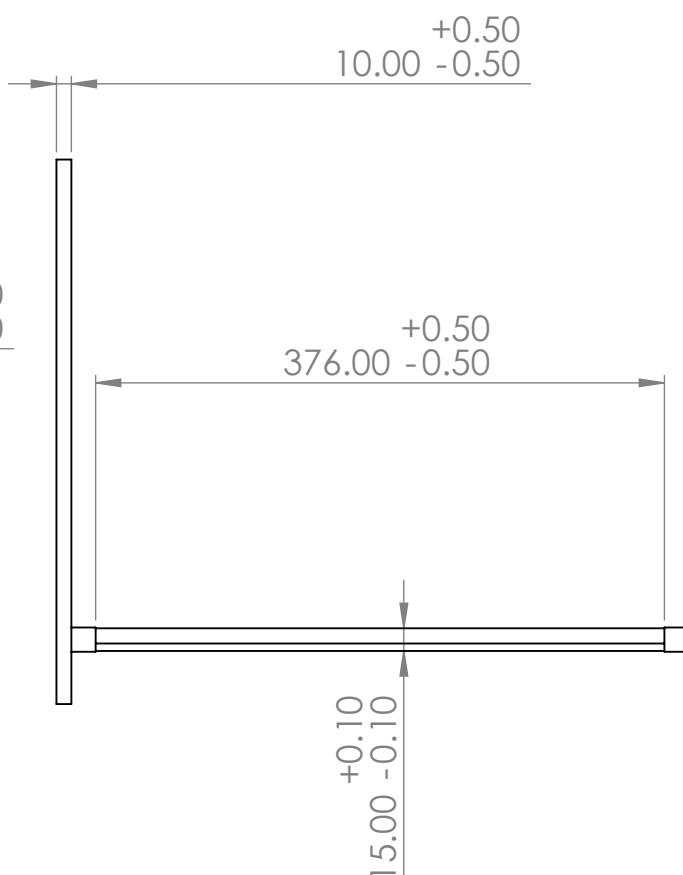
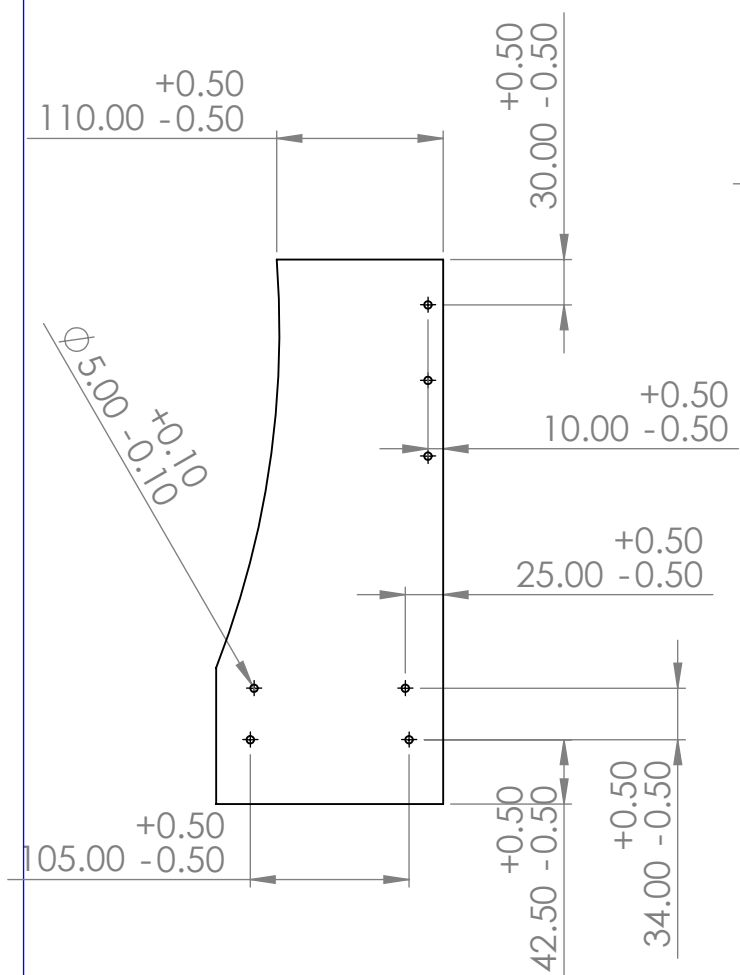
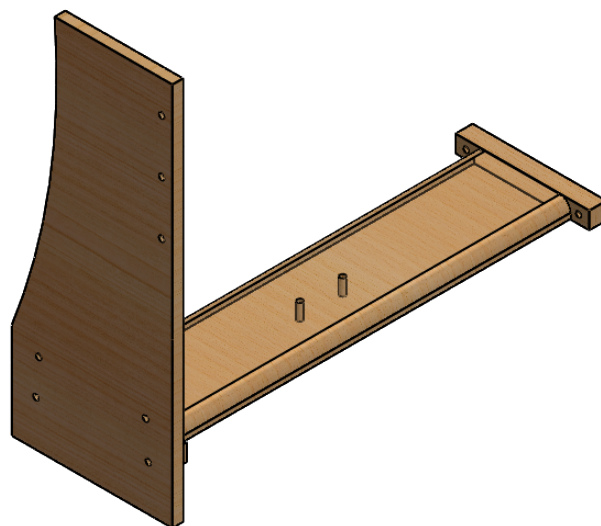
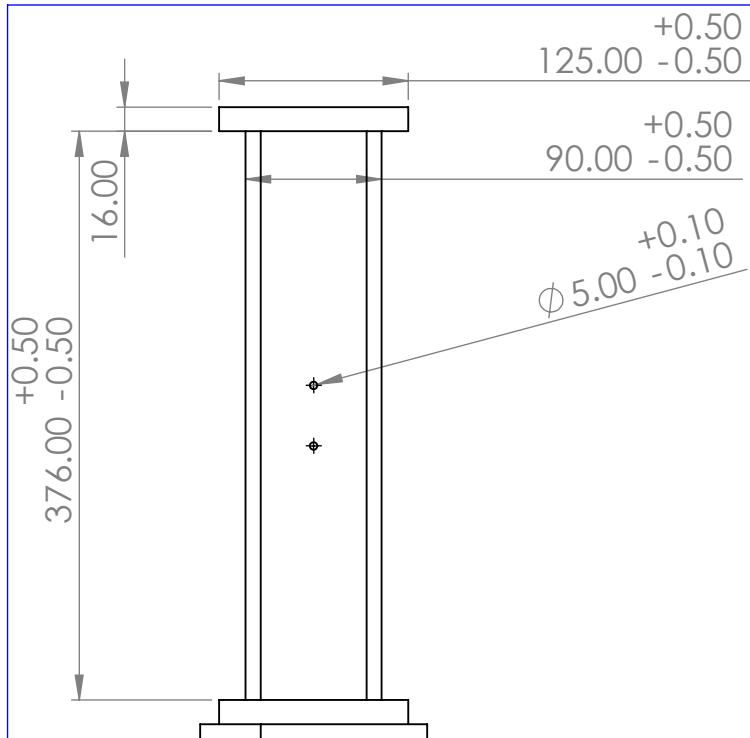
Format	A4
Echelle	1:5
Date	Mai 2019

Titre :


**support gauch de l'axe Y.**

Réparer Par :

Bouyahia Yessine



**Université A.B.B CM Département Génie Mécanique**

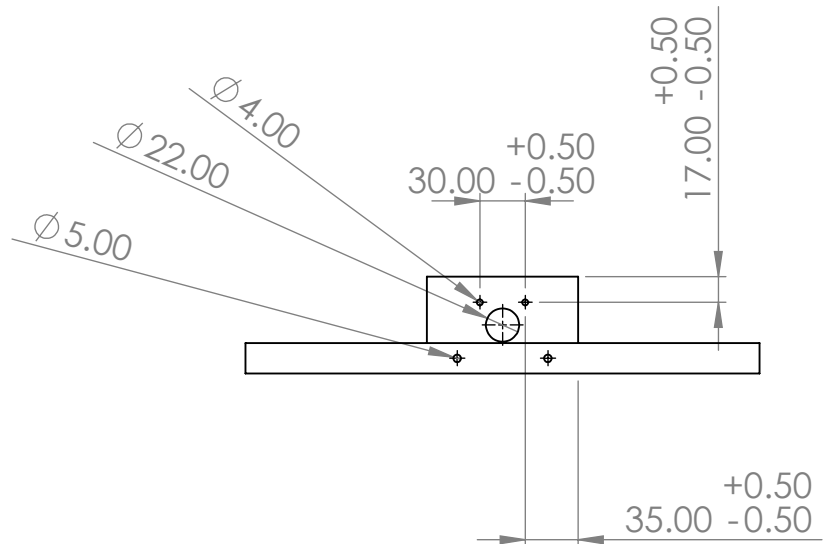
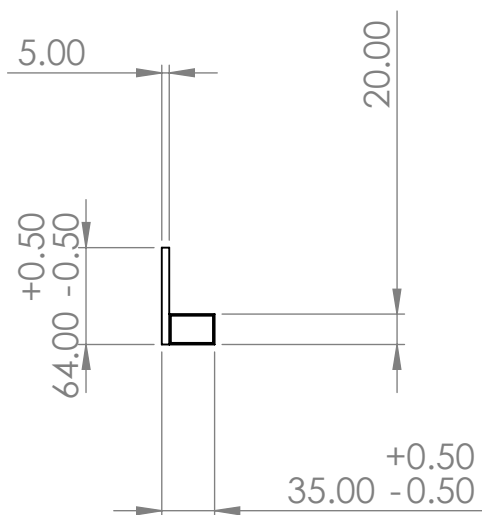
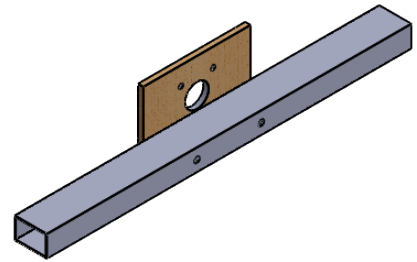
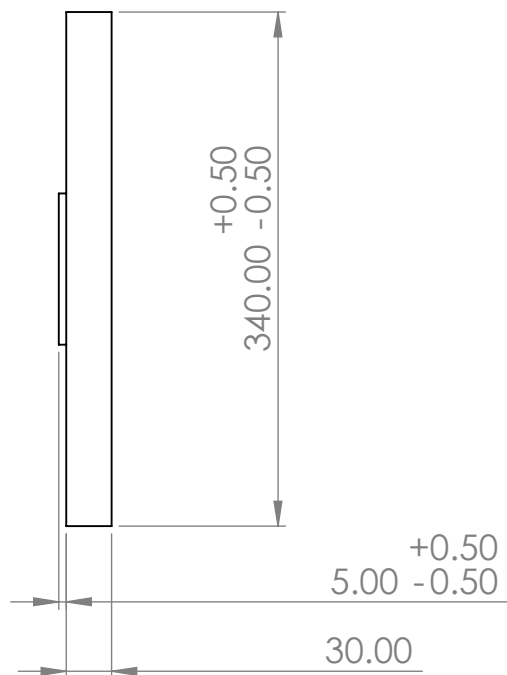
	
Format	A4
Echelle	1:5
Date	Mai 2019

Titre :

**support droit de l'axe Y.**

Réparer Par :

Bouyahia Yessine



**Université A.B.B CM Département Génie Mécanique**

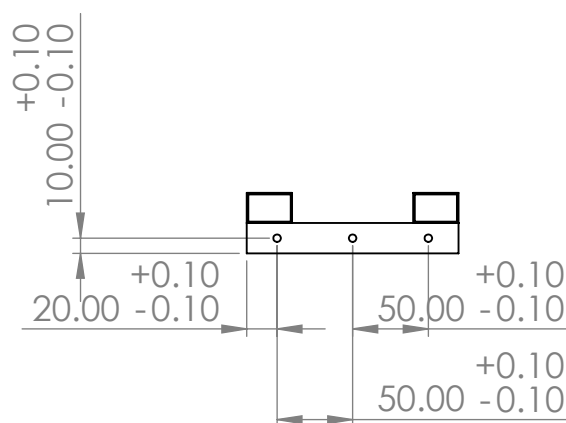
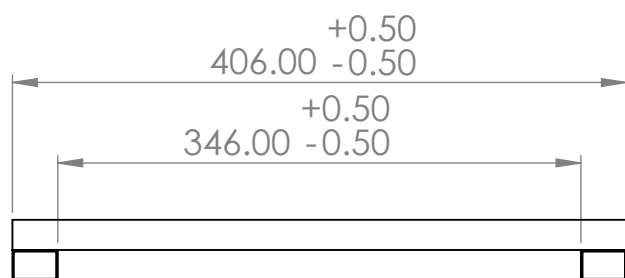
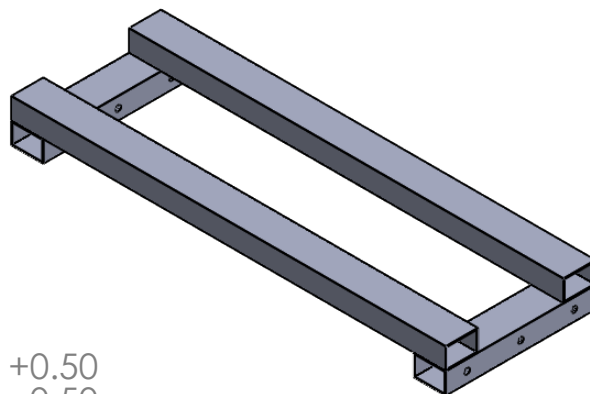
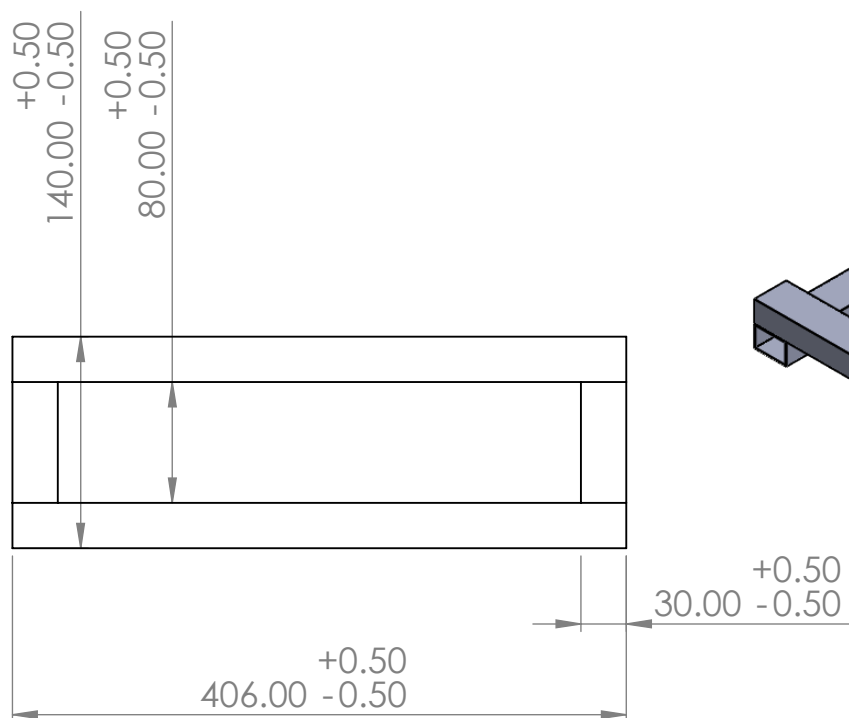
Format	A4
Echelle	1:5
Date	Mai 2019

Titre :

**support moteur de l'axe Y**

Réparer Par :

Bouyahia Yessine



**Université A.B.B CM Département Génie Mécanique**

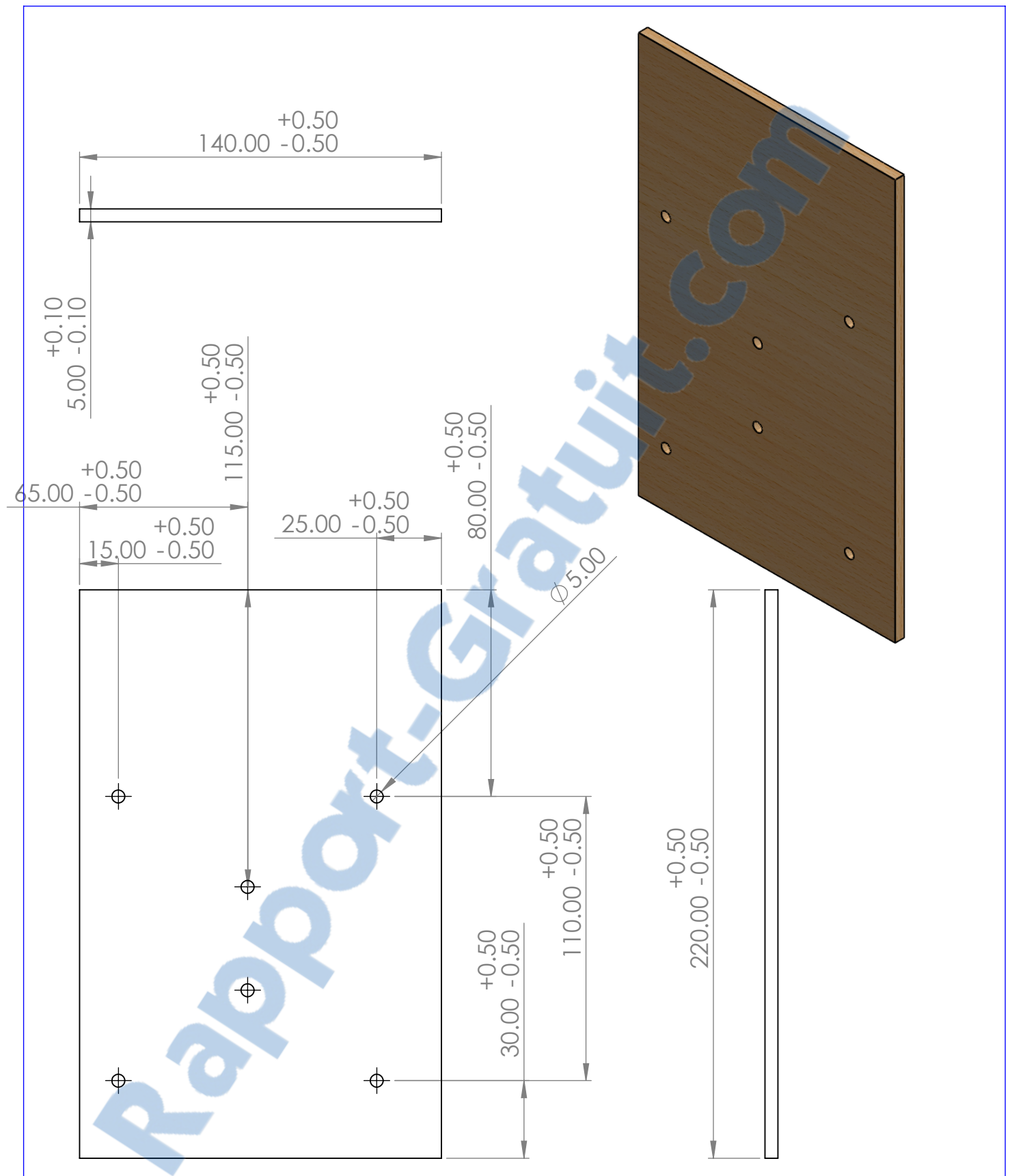
Format	A4
Echelle	1:5
Date	Mai 2019

Titre :


**Support axe X**

Réparer Par :

Bouyahia Yessine



**Université A.B.B CM Département Génie Mécanique**

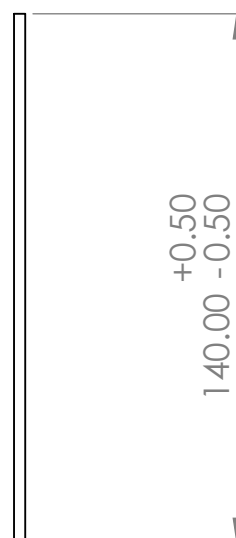
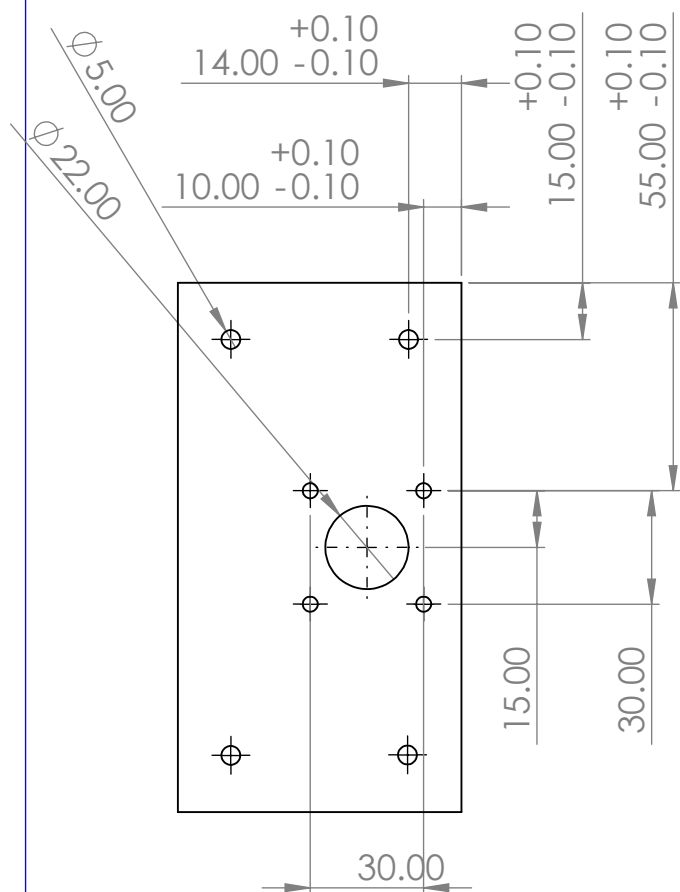
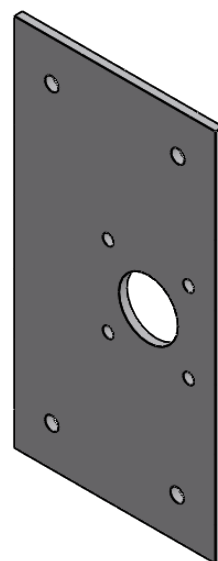
	
Format	A4
Echelle	1:5
Date	Mai 2019

Titre :

**plaque axe X**

Réparer Par :

Bouyahia Yessine



**Université A.B.B CM Département Génie Mécanique**

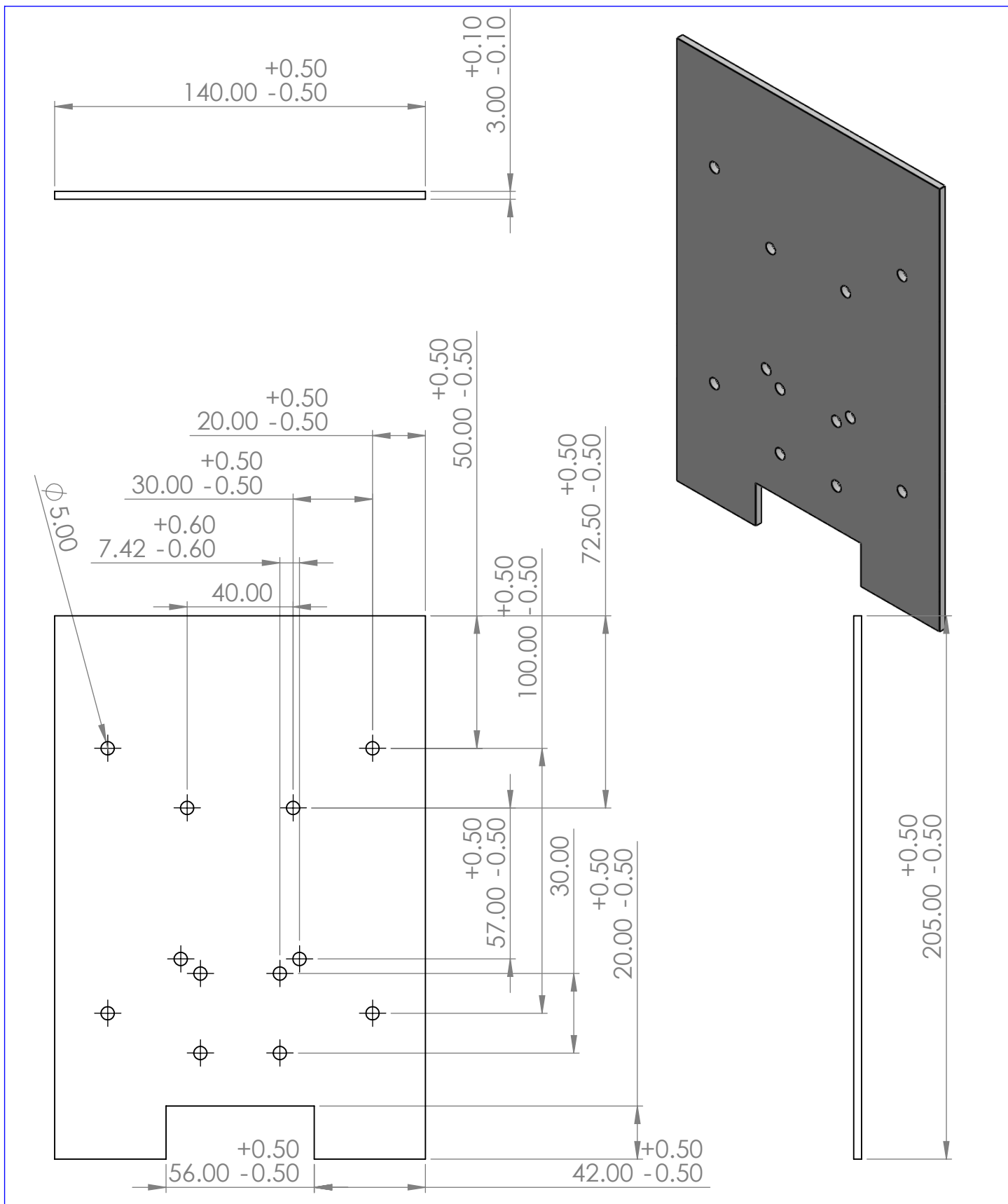
Format	A4
Echelle	1:2
Date	Mai 2019

Titre :


**support moteur de l'axe X.**

Réparer Par :

Bouyahia Yessine

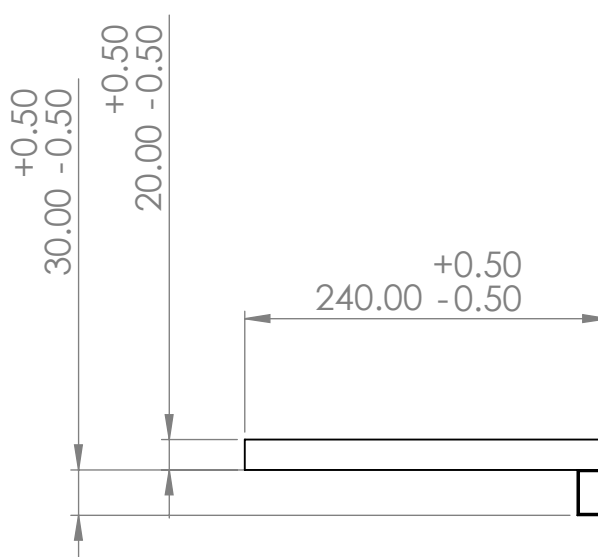
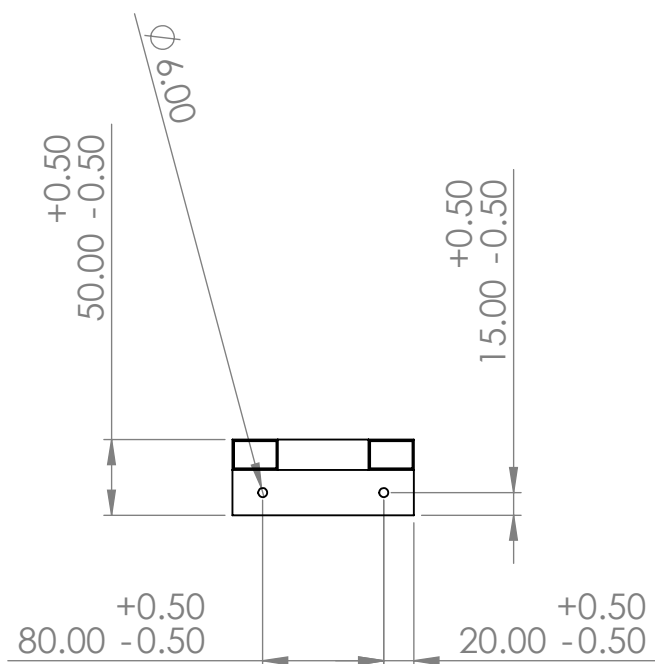
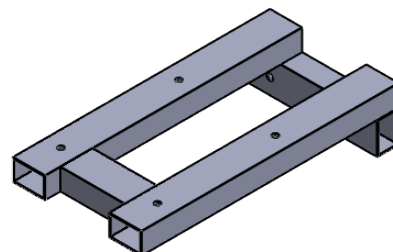
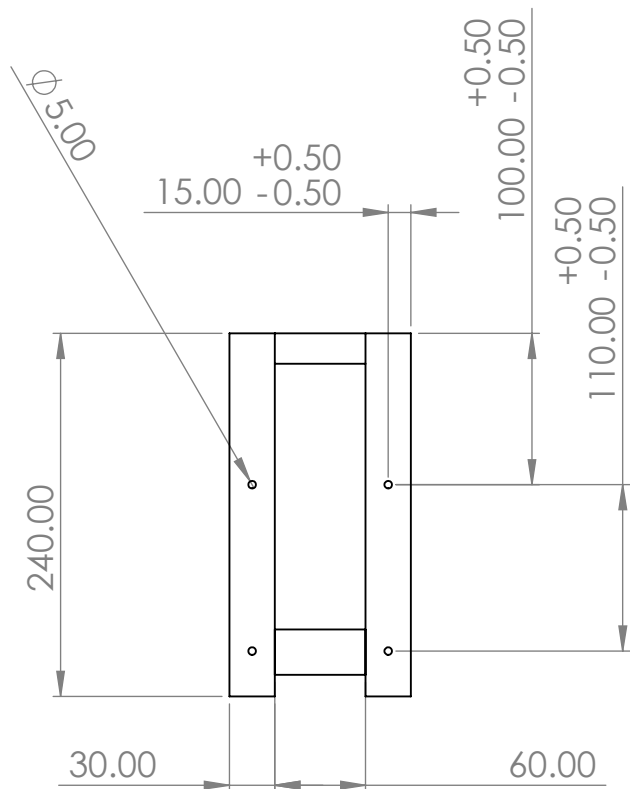


**Université A.B.B CM Département Génie Mécanique**

	
Format	A4
Echelle	1:2
Date	Mai 2019

Titre :  
*Rapport-gratuit.com*  
**Plaque axe Z**  
 LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Réparer Par :  
 Bouyahia Yessine



**Université A.B.B CM Département Génie Mécanique**

Format	A4
Echelle	1:5
Date	Mai 2019

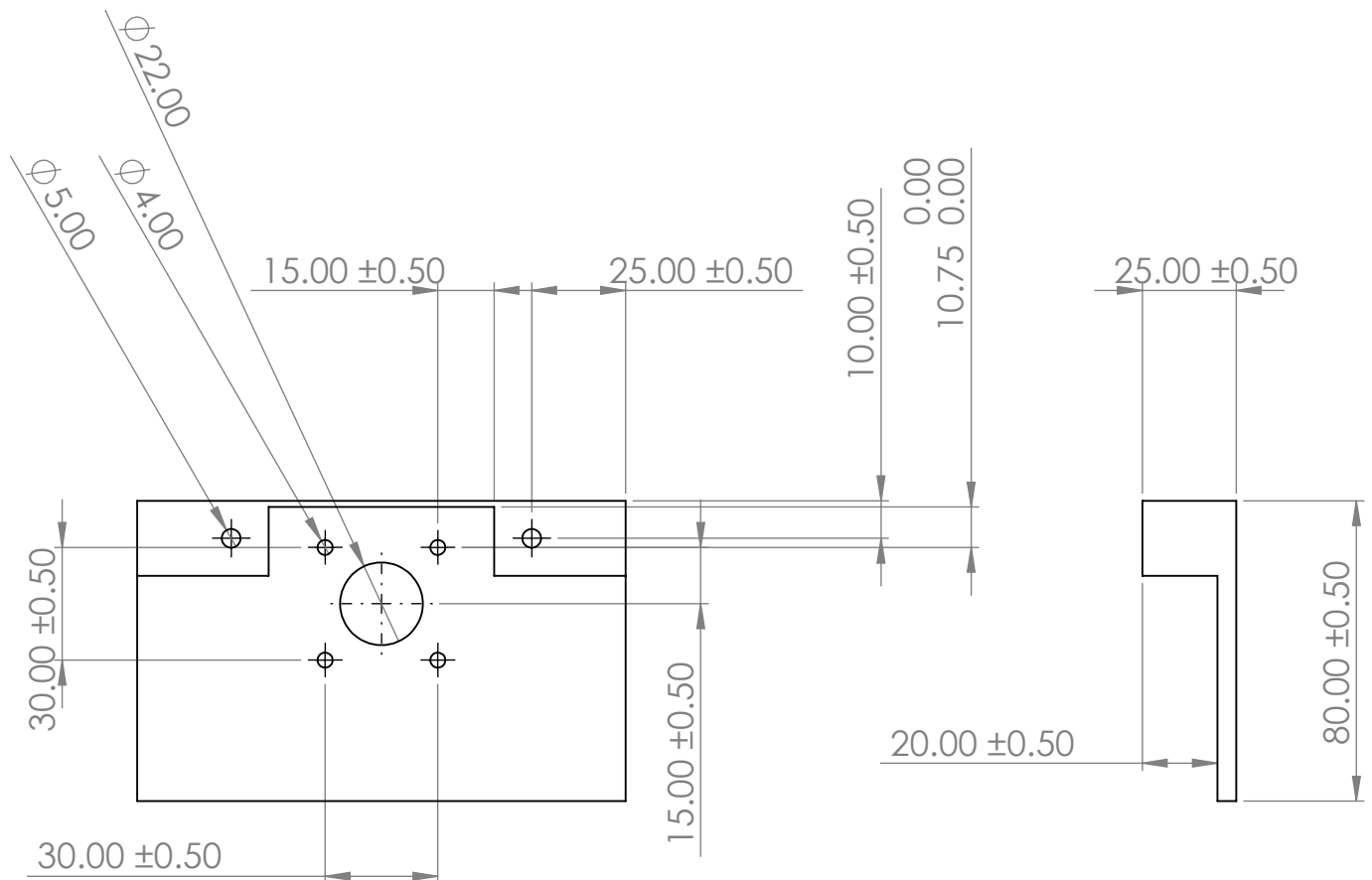
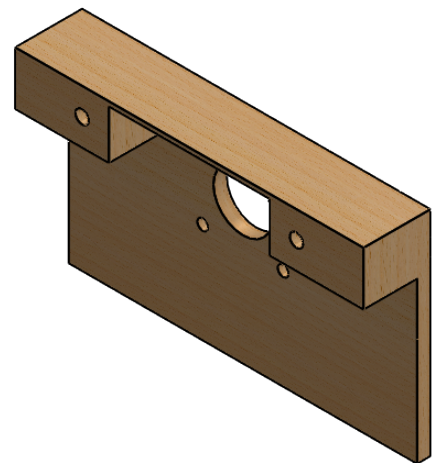
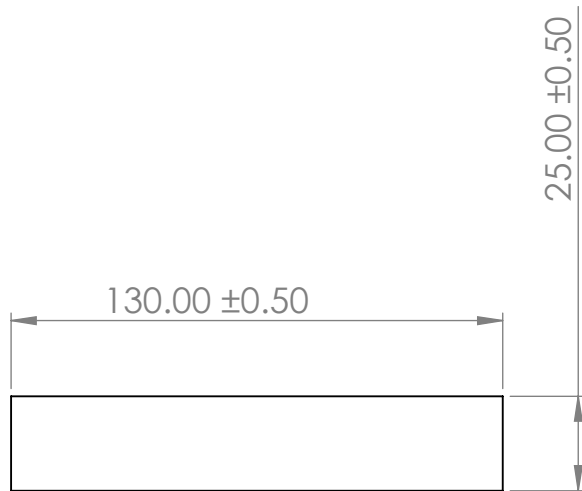
Titre :

**support moteur de l'axe Z**

Réparer Par :

Bouyahia Yessine





**Université A.B.B CM Département Génie Mécanique**

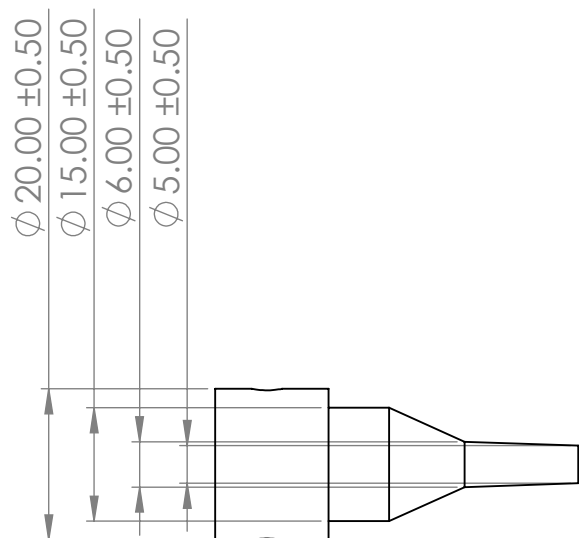
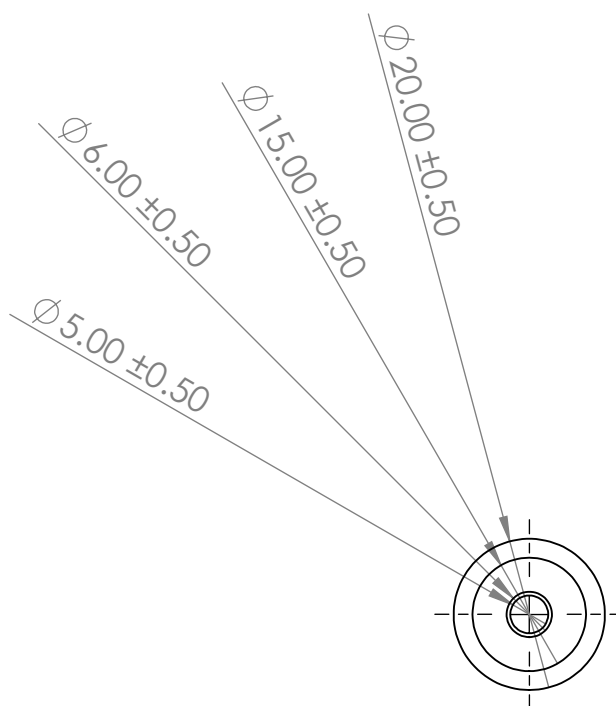
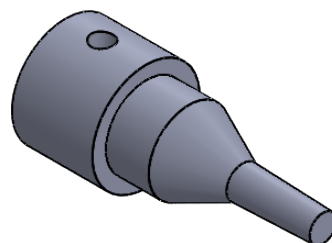
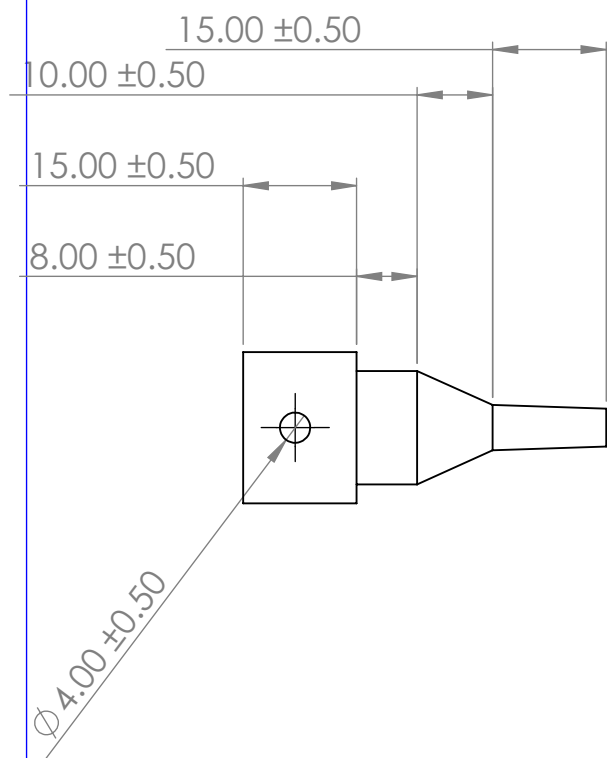
Format	A4
Echelle	1:2
Date	Mai 2019

Titre :

**Support moteur axe Z**

Réparer Par :

Bouyahia Yessine



**Université A.B.B CM Département Génie Mécanique**

Format	A4
Echelle	1:1
Date	Mai 2019

Titre :

**Accouplement**

Réparer Par :

Bouyahia Yessine