

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
Département de génie mécanique



Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie  
Mécanique

**Conception et dimensionnement d'une machine de soudage par  
le procédé FSW**

Présenté et soutenu le 04/07/2022 par :

**Lyes SMAILI**

**Mustapha KEDDOUS**

**Composition du jury**

|                  |                             |            |            |
|------------------|-----------------------------|------------|------------|
| <b>Président</b> | <b>M. Mohamed TAZI</b>      | <b>MAA</b> | <b>ENP</b> |
| <b>Promoteur</b> | <b>M. Mohamed BENBRAIKA</b> | <b>MAA</b> | <b>ENP</b> |
| <b>Promoteur</b> | <b>M. Djamel SAIDI</b>      | <b>MCB</b> | <b>ENP</b> |
| <b>Promoteur</b> | <b>M. Hamid SEDJAL</b>      | <b>MAA</b> | <b>ENP</b> |
| <b>Examineur</b> | <b>M. Mohamed LATRECHE</b>  | <b>MAA</b> | <b>ENP</b> |

**ENP 2022**



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de génie mécanique



Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie  
Mécanique

**Conception et dimensionnement d'une machine de soudage par  
le procédé FSW**

Présenté et soutenu le 04/07/2022 par :

**Lyes SMAILI**

**Mustapha KEDDOUS**

**Composition du jury**

|                  |                             |            |            |
|------------------|-----------------------------|------------|------------|
| <b>Président</b> | <b>M. Mohamed TAZI</b>      | <b>MAA</b> | <b>ENP</b> |
| <b>Promoteur</b> | <b>M. Mohamed BENBRAIKA</b> | <b>MAA</b> | <b>ENP</b> |
| <b>Promoteur</b> | <b>M. Djamel SAIDI</b>      | <b>MCB</b> | <b>ENP</b> |
| <b>Promoteur</b> | <b>M. Hamid SEDJAL</b>      | <b>MAA</b> | <b>ENP</b> |
| <b>Examineur</b> | <b>M. Mohamed LATRECHE</b>  | <b>MAA</b> | <b>ENP</b> |

**ENP 2022**

## ملخص:

يهدف هذا المشروع إلى تصميم وحساب أبعاد نموذج آلة لحام تحريكي احتكاكي. هذه الآلة مخصصة للحام صفائح الألمنيوم بسمك 6 مم أو أقل. تم تصميم نموذج الآلة و كل الأجزاء المكونة له بواسطة أداة التصميم بمساعدة الحاسوب SolidWorks. تتكون الدراسة من حساب أبعاد الأجزاء المختلفة باستخدام الأساليب النظرية والتحقق عن طريق أدوات المحاكاة الرقمية من أجل تبرير الإختيارات التي تم اتخاذها أثناء الصميم.

الكلمات المفتاحية: التصميم -حساب أبعاد-اللحام -الاحتكاك -الخط -SolidWorks.

## Abstract:

This project aims to design and dimension a prototype of a friction stir welding machine. This machine is intended for welding aluminum sheets with a thickness of 6 mm or less. The computer-aided design tool SolidWorks carries out the design of the prototype and all the parts that constitute it. The study consists of dimensioning of the different parts using theoretical methods and a verification carried out using digital simulation tools in order to justify the choices made during the design phase.

**Keywords:** Design, sizing, welding, friction, stir, SolidWorks.

## Résumé :

Ce projet a pour but la conception et le dimensionnement d'un prototype de machine de soudage par friction malaxage. Cette machine est destinée au soudage des tôles d'aluminium d'épaisseur de 6 mm ou moins. La conception du prototype et toutes les pièces qui le constituent est réalisée par l'outil de conception assistée par ordinateur SolidWorks. L'étude consiste en dimensionnement de différentes pièces à l'aide des méthodes théoriques et en vérification menée à l'aide des outils de simulation numérique afin de justifier les choix pris durant la conception.

**Mots-clés :** Conception, dimensionnement, soudage, friction, malaxage, SolidWorks.

## Dédicace

*A ma famille.*

**SMAILI Lyes**

*Je dédie ce travail à ma source d'énergie, à mes principaux soutiens, mon père KEDDOUS Nacir et ma mère HAIBECHE Cherifa, à ma chers sœur Akila et mon frère Hamza.*

*A ma grande famille, à tous les amis de ma promotion et à mes chers amis Zaki, Wadie et Mohamed.*

**KEDDOUS Mustapha**

## **Remerciement**

Tout d'abord, nous remercions ALLAH le tout puissant d'avoir nous donner le courage et la patience pour terminer ce travail.

En second lieu, nous tenons à remercier sincèrement nos encadrants dans ce projet Mr. Mohamed BENBRAIKA, Mr. Djamel SAIDI et Mr. Hamid SEDJAL, pour leur disponibilité et pour nous avoir guidé tout au long de ce projet.

Nous voulons remercier également les membres du jury Mr Mohamed TAZI et Mr Brahim GUERGUEB pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'examiner.

Nous remercions aussi Mr BOUAROUJ, professeur à l'USTHB et son doctorant Yacine BOUCHERIT pour nous avoir aidé.

Un grand remerciement à Mr. Amine MEZGHRANI et à l'ingénieur Fouad NAIT OUABBAS de l'entreprise ACMP à OULED MOUSSA pour leur aide précieuse

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire. Merci à tous et à toutes.

## TABLE DES MATIERES

|  |    |
|--|----|
| <b>Introduction générale</b> .....   | 13 |
| <b>Chapitre 1 : Étude bibliographique sur le soudage par friction malaxage FSW</b> ..... | 14 |
| 1.1 Introduction .....   | 15 |
| 1.2 Principe du procédé FSW .....  | 15 |
| 1.2.1 Phase de plongée .....   | 15 |
| 1.2.2 Phase de préchauffage.....   | 15 |
| 1.2.3 Phase de soudage .....   | 16 |
| 1.2.4 Phase de retrait .....   | 16 |
| 1.3 La microstructure .....  | 17 |
| 1.3.1 BM .....   | 17 |
| 1.3.2 HAZ.....   | 17 |
| 1.3.3 TMAZ.....  | 17 |
| 1.3.4 SZ pépite de soudure .....   | 17 |
| 1.4 Paramètres du soudage .....  | 18 |
| 1.4.1 Les paramètres du procédé .....  | 18 |
| 1.4.2 Les paramètres de l’outil .....  | 20 |
| 1.5 Configurations de soudage .....  | 22 |
| 1.6 Matériaux de l’outil et des pièces à souder .....                                    | 22 |
| 1.7 Phénomènes physiques .....   | 22 |
| 1.7.1 Phénomène mécanique .....  | 23 |
| 1.7.2 Phénomène thermique .....  | 23 |
| 1.7.3 Phénomène métallurgique .....  | 23 |
| 1.8 Les avantages du procédé FSW .....   | 23 |
| 1.9 Les inconvénients du procédé FSW .....   | 24 |
| 1.10 Les machines industrielles utilisées pour le FSW .....                              | 24 |
| 1.10.1 Les fraiseuses modifiées .....  | 24 |
| 1.10.2 Les machines FSW dédiées .....  | 26 |
| 1.10.3 Les robots poly-articulés .....   | 26 |
| 1.10.4 Les robots à architecture parallèle.....  | 27 |
| 1.11 Conclusion .....  | 28 |
| <b>Chapitre 2 : Cahier des charges et solutions technologiques.</b> .....                | 29 |
| 2.1 Introduction .....   | 30 |
| 2.2 Cahier des charges .....   | 30 |
| 2.2.1 Fonction principale.....   | 30 |
| 2.2.2 Les sous fonctions .....   | 30 |

|  |  |    |
|--|--|----|
| 2.3  | Source de mouvement .....                                | 30 |
| 2.3.1  | La rotation de l'outil .....                             | 30 |
| 2.3.2  | Les moteurs pas à pas .....                              | 32 |
| 2.4  | Transformation de mouvement .....                        | 34 |
| 2.4.1  | Pignon et crémaillère .....                              | 34 |
| 2.4.2  | Vis à billes .....                                       | 35 |
| 2.5  | Guidage en translation .....                             | 36 |
| 2.5.1  | Les glissières à contact direct .....                    | 36 |
| 2.5.2  | Guidages par interposition d'éléments antifriction ..... | 37 |
| 2.5.3  | Les glissières à éléments roulants .....                 | 37 |
| 2.6  | Outil .....  | 39 |
| 2.7  | Le porte-outil .....                                     | 40 |
| 2.8  | Roulement à bille .....                                  | 41 |
| 2.9  | Accouplements .....                                      | 41 |
| 2.9.1  | Accouplement rigide .....                                | 41 |
| 2.9.2  | Accouplement flexible .....                              | 42 |
| 2.10   | Liaisons mécaniques et schéma cinématique .....          | 42 |
| 2.11   | Conclusion .....   | 44 |
| <b>Chapitre 3 : Conception des éléments de la machine.</b> .....                 |  | 45 |
| 3.1  | Introduction .....                                       | 46 |
| 3.2  | Outil de la CAO .....                                    | 46 |
| 3.3  | Démarche de la conception .....                          | 46 |
| 3.4  | Etapas de conception .....                               | 48 |
| 3.4.1  | Conception du châssis .....                              | 48 |
| 3.4.2  | Conception de l'axe X .....                              | 49 |
| 3.4.3  | Conception des axes Y et Z .....                         | 49 |
| 3.4.4  | Conception de l'axe de rotation .....                    | 50 |
| 3.4.5  | Conception du palier-porte-outil .....                   | 51 |
| 3.4.6  | Conception de l'outil .....                              | 51 |
| 3.4.7  | Conception du moyen de fixation des pièces .....         | 51 |
| 3.5  | Bilans de la machine .....                               | 52 |
| 3.5.1  | Bilan des pièces à usiner .....                          | 52 |
| 3.5.2  | Bilan des accessoires .....                              | 53 |
| 3.5.3  | Bilan de la machine .....                                | 54 |
| 3.6  | Conclusion .....   | 54 |
| <b>Chapitre 4 : Dimensionnement des différents éléments de la machine.</b> ..... |  | 55 |
| 4.1  | Introduction .....                                       | 56 |



|   |  |           |
|---|--|-----------|
| 4.2   | Choix des moteurs .....  | 56        |
| 4.2.1   | Calcul de la puissance du moteur asynchrone .....                                    | 56        |
| 4.2.2   | Calcul du couple des moteurs pas à pas .....   | 58        |
| 4.3   | Vérification de la résistance des éléments de la machine aux efforts appliqués ..... | 59        |
| 4.3.1   | Simulation à l'aide du logiciel SOLIDWORKS .....                                     | 60        |
| 4.4   | Dimensionnement des tiges des glissières .....                                       | 61        |
| 4.4.1   | Dimensionnement des tiges des glissières suivant l'axe X .....                       | 61        |
| 4.4.2   | Dimensionnement des tiges des glissières suivant l'axe Y .....                       | 64        |
| 4.4.3   | Dimensionnement des tiges des glissières suivant l'axe Z .....                       | 67        |
| 4.5   | Vérification de la résistance au chargement pour l'outil et porte-outil .....        | 71        |
| 4.6   | Calculs des clavettes .....  | 72        |
| 4.6.1   | Critère de cisaillement .....  | 72        |
| 4.6.2   | Critère de pression de matage .....  | 73        |
| 4.7   | Conclusion .....   | 74        |
| <b>Chapitre 5 : Gammes d'usinage et gamme d'assemblage.</b> ..... |  | <b>75</b> |
| 5.1   | Introduction .....   | 76        |
| 5.2   | Gammes d'usinage .....   | 76        |
| 5.2.1   | Gamme d'usinage de la table de travail .....   | 76        |
| 5.2.2   | Gamme d'usinage du corps de l'outil .....  | 76        |
| 5.2.3   | Gamme d'usinage arbre-porte-outil .....  | 77        |
| 5.2.4   | Gamme d'usinage de la bride .....  | 78        |
| 5.2.5   | Gamme d'usinage du palier moteur Y .....   | 79        |
| 5.2.6   | Gamme d'usinage bride moteur X .....   | 80        |
| 5.3   | Gamme d'assemblage .....   | 81        |
| 5.4   | Conclusion .....   | 82        |
| <b>Conclusion générale</b> .....                                  |  | <b>83</b> |
| <b>Références bibliographiques</b> .....                          |  | <b>84</b> |
| <b>Annexe</b> .....   |  | <b>87</b> |

## LISTE DES FIGURES

|  |    |
|--|----|
| Figure 1-1: Illustration du FSW .....  | 15 |
| Figure 1-2 : Représentation du côté reculant et avançant .....   | 16 |
| Figure 1-3: Les étapes du soudage FSW .....  | 17 |
| Figure 1-4 Schéma des zones microstructurales dans FSW .....   | 18 |
| Figure 1-5 micrographie montrant les diverses zones .....  | 18 |
| Figure 1-6 Les paramètres du procédé FSW .....   | 20 |
| Figure 1-7 : différentes géométries et formes utilisées pour l'épaulement de l'outil .....   | 21 |
| Figure 1-8 : synthèse des géométries et des formes utilisées pour le pion FSW .....  | 21 |
| Figure 1-9 : Exemple de dimensions d'un outil pour le soudage des AA6351 .....   | 21 |
| Figure 1-10 : Configurations de joints pour le soudage par friction malaxage : (a) bout à bout, (b) en coin, (c) en T, (d) transparence, (e) transparence multiple, (f) T par transparence, et (g) angle ..... | 22 |
| Figure 1-11 Transferts thermiques induits par le procédé FSW .....   | 23 |
| Figure 1-12 : Fraiseuse adaptée pour le FSW .....  | 25 |
| Figure 1-13 Exemple de machine dédiée au FSW. A- Machine ESAB Legio .....  | 26 |
| Figure 1-14 Robot poly-articulé pour FSW de l'université de Coimbra .....  | 27 |
| Figure 1-15 Tricept TR805 utilisé en FSW .....   | 28 |
| Figure 2-1 moteur synchrone .....  | 31 |
| Figure 2-2 moteur asynchrone .....   | 31 |
| Figure 2-3 moteur pas à pas .....  | 32 |
| Figure 2-4 : Fonctionnement d'un moteur pas à pas à aimants permanents (configuration "monophasé"). .....  | 33 |
| Figure 2-5 : Types de moteur pas à pas : moteur pas à pas à réluctance, moteur pas à pas à aimant permanent et moteur pas à pas hybride .....  | 34 |
| Figure 2-6 système Pignon et crémaillère .....   | 35 |
| Figure 2-7 : vis à billes .....  | 35 |
| Figure 2-8 les composants d'une vis à billes .....   | 36 |
| Figure 2-9 : guidage prismatique .....   | 36 |
| Figure 2-10 : guidage par arbre .....  | 37 |
| Figure 2-11 (a) Palier lisse monté serré. (b) Élément à visser .....   | 37 |
| Figure 2-12 : guidage de type R .....  | 38 |
| Figure 2-13 : guidage de type N/O .....  | 38 |
| Figure 2-14 Guidage type de L/M .....  | 39 |
| Figure 2-15 Vue éclatée d'un roulement à rouleaux coniques. De gauche à droite : chemin de roulement intérieur, éléments roulants, cage et chemin de roulement extérieur.....                                  | 40 |
| Figure 2-16 roulement à billes .....   | 41 |
| Figure 2-17 : accouplement rigide. ....  | 42 |
| Figure 2-18 accouplement flexible.....   | 42 |
| Figure 2-19 : Schéma cinématique de la machine FSW. ....   | 43 |
| Figure 3-1 : Première conception. ....   | 46 |
| Figure 3-2 : Deuxième conception. ....   | 47 |
| Figure 3-3 : Troisième conception. ....  | 47 |
| Figure 3-4 : Quatrième conception.....   | 48 |
| Figure 3-5 : Profilé carré, cadre mécano-soudé et châssis. ....  | 48 |
| Figure 3-6 : Goussets : de coin intérieur, de coin extérieur et plat. ....   | 49 |
| Figure 3-7 : Conception de l'axe X. ....   | 49 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 3-8 : Conception de l'axe Y.....  | 49 |
| Figure 3-9 : Conception de l'axe Z. ....   | 50 |
| Figure 3-10 : Conception de l'axe de rotation.....   | 50 |
| Figure 3-11 : Vue éclatée du palier-porte-outil.....   | 51 |
| Figure 3-12 : Vue éclatée de l'outil.....  | 51 |
| Figure 3-13 : Système de fixation des pièces à souder. ....  | 52 |
| Figure 3-14 : la bride.....  | 52 |
| Figure 4-1 : Schématisation des différentes forces appliquées sur l'épaulement. ....                             | 56 |
| Figure 4-2 : les configurations de la tige X.....  | 62 |
| Figure 4-3 : Visualisation de la distribution des contraintes pour la tige de l'axe X<br>(Configuration 1).....  | 63 |
| Figure 4-4: Visualisation de la déformée (échelle exagérée) pour la tige de l'axe X,<br>(Configuration 1).....   | 63 |
| Figure 4-5: Visualisation de la distribution des contraintes pour la tige de l'axe X<br>(Configuration 2).....   | 63 |
| Figure 4-6 : Visualisation de la déformée (échelle exagérée) pour la tige de l'axe X,<br>(Configuration 2).....  | 64 |
| Figure 4-7 : Vue isométrique des éléments supportés par les tiges suivant l'axe Y.....                           | 64 |
| Figure 4-8 : Schéma décrivant la disposition des forces et des réactions. ....                                   | 65 |
| Figure 4-9 : les configurations de la tige Y.....  | 66 |
| Figure 4-10 : Visualisation de la distribution des contraintes pour la tige de l'axe Y<br>(Configuration 1)..... | 67 |
| Figure 4-11 : Visualisation de la déformée (échelle exagérée) pour la tige de l'axe Y,<br>(Configuration 1)..... | 67 |
| Figure 4-12 : Visualisation de la distribution des contraintes pour la tige de l'axe X<br>(Configuration 2)..... | 67 |
| Figure 4-13 : Visualisation de la déformée (échelle exagérée) pour la tige de l'axe X,<br>(Configuration 2)..... | 67 |
| Figure 4-14 : Vue isométrique des éléments supportés par les tiges suivant l'axe Z. ....                         | 68 |
| Figure 4-15 : Schéma décrivant la disposition des forces et des réactions. ....                                  | 68 |
| Figure 4-16 : les configurations de la tige Z. ....  | 69 |
| Figure 4-17 : Visualisation de la distribution des contraintes pour la tige de l'axe Z<br>(Configuration 1)..... | 70 |
| Figure 4-18 : Visualisation de la déformée (échelle exagérée) pour la tige de l'axe Z,<br>(Configuration 1)..... | 70 |
| Figure 4-19 : Visualisation de la distribution des contraintes pour la tige de l'axe X<br>(Configuration 2)..... | 70 |
| Figure 4-20: Visualisation de la déformée (échelle exagérée) pour la tige de l'axe X,<br>(Configuration 2).....  | 70 |
| Figure 4-21 : Schéma des forces appliquées sur l'outil et le porte-outil.....                                    | 71 |
| Figure 4-22 : Visualisation de la distribution des contraintes sur l'outil et le porte-outil.....                | 71 |
| Figure 4-23 : Différentes formes de clavettes parallèles.....  | 72 |
| Figure 4-24 : Clavette montée.....   | 72 |

## LISTE DES TABLEAUX

|  |    |
|--|----|
| Table 3-1 : Liste des pièces à usiner. ....  | 52 |
| Table 3-2: Liste des pièces à acheter.....   | 53 |
| Table 3-3 : Bilan de la machine. ....  | 54 |
| Table 4-1 : Caractéristique du moteur asynchrone de puissance 1,1kW. ....  | 58 |
| Table 4-2 : Caractéristique du moteur Nema 23 de couple de 1,8Nm. ....   | 59 |
| Table 4-3: Liste des étapes de la simulation. ....   | 60 |
| Table 4-4 : Résultats de la simulation pour la tige X.....   | 62 |
| Table 4-5 : Résultats de la simulation pour la tige Y.....   | 67 |
| Table 4-6 : Résultats de la simulation pour la tige Z. ....  | 69 |
| Table 4-7 : Dimensions de la clavette. ....  | 72 |
| Table 4-8 : Pressions de matage admissibles en fonction du type de montage et des conditions de fonctionnement. .... | 74 |

## Liste des abréviations

FSW : friction stir welding.

TWI : the welding institute.

RDM : resistance des matériaux.

AS : advancing side.

RS : retreating side.

BM : base metal.

HAZ : heat affected zone.

Tmaz : Thermo- mechanically affected zone.

SZ : stir zone.

PM : permanent magnet.

VR : variable reluctance.

CAO : conception assiste par ordinateur.

## Liste de nomenclature

$\omega$  : vitesse de rotation [rpm]

$\gamma$  : vitesse d'avance [mm/min]

D : diamètre de l'épaulement [mm]

d : diamètre du pion [mm]

$C_m$  : couple du moteur asynchrone [N.m]

T : effort tangent [N]

$dN$  : effort normal [N]

$\mu_d$  : coefficient de frottement entre l'acier et l'aluminium.

P : pression [MPa]

$F_N$  : effort axial [N]

$P_m$  : puissance mécanique du moteur [kW]

$\eta_{palier}$  : Rendement mécanique des paliers.

$\eta_m$  : Rendement mécanique du moteur.

$P_e$  : puissance électrique du moteur [kW]

$C_{stp}$  : Couple du moteur pas-à-pas [Nm]

$F_a$  : effort axial appliqué sur la douille de la vis à billes [N].

$P_h$  : pas de la vis [mm].

s : facteur de sécurité.

$F_s$  : effort de soudage [N]

$R_e$  : la limite élastique [MPa]

$\tau_{cis}$  : est la contrainte de cisaillement

$R_g$  : résistance au glissement [MPa]

$R_{pg}$  : résistance pratique au glissement [MPa]

$p_m$  : pression de matage [MPa]

$p_a$  : pression de matage admissible [MPa]

## Introduction générale

L'aluminium est un des matériaux les plus demandés dans tous les secteurs de l'industrie (construction, transport, équipements électriques ...), ceci grâce à sa disponibilité et ses rapports élevés de résistance aux influences atmosphériques et à la corrosion.

Le soudage des alliages d'aluminium est difficile par les procédés classiques. Ces derniers présentent de nombreux désavantages, notamment liés à la préparation des surfaces des matériaux à souder, la complexité de la procédure qui nécessite un traitement spécial et son impact sur l'environnement. Aussi, la structure métallurgique des matériaux subit des modifications qui résultent de la concentration de contraintes importantes au niveau du cordon de soudure. C'est pour ces raisons qu'une orientation vers des procédés de soudage spécifique tel que le FSW est devenue nécessaire.

Le soudage par friction-malaxage (FSW) est un procédé de soudage relativement nouveau, il a été développé par the « Welding Institute » (TWI), Cambridge, Royaume-Uni, en 1991. Le FSW offre des avantages significatifs par rapport aux processus d'assemblage conventionnels. Ce système a attiré l'attention des ingénieurs comme des industriels en tant que méthode de liaison à l'état solide avec un faible apport de chaleur et s'est généralisé en tant que technique de joint à recouvrement pour souder ensemble des tôles en alliage d'aluminium ou même des tôles dissimilaires.

Notre département ne disposant pas de ce type de machine, nous avons visé comme objectif dans le cadre de ce Projet de Fin d'Etudes, la conception d'un modèle de laboratoire. La machine à réaliser servira à enrichir l'atelier de soudage de notre département de génie mécanique avec une machine à souder FSW automatisée à 3 axes. Cette initiative va permettre aux étudiants de génie mécanique de réaliser des soudures FSW et permettre de produire des échantillons d'éprouvettes pour mener des études sur les propriétés mécaniques, la structure microstructurale, faire des essais RDM et étudier les influences des paramètres de soudages sur les cordons réalisés.

Le prototype de la machine FSW que nous avons l'intention de concevoir permet de réaliser des joints de soudure sur des pièces en alliages d'aluminium de 6 mm d'épaisseur.

L'étude présentée est subdivisée en quatre chapitres :

Le premier chapitre est réservé aux généralités sur le soudage avec friction malaxage, le principe du FSW, les paramètres du procédé et de l'outil, les phénomènes physiques et les machines utilisées pour le FSW.

Le deuxième chapitre est dédié au cahier des charges, en se basant sur les contraintes imposées par ce dernier, des solutions proposées sont présentées avec les différents éléments de la machine.

Dans le troisième chapitre, nous allons présenter notre démarche de conception du prototype et les différentes pièces qui le constituent.

Pour le quatrième chapitre nous allons faire le calcul de dimensionnement des différents organes constituant le prototype et de valider le modèle proposé.

Et dans le dernier chapitre, nous présenterons la procédure de la réalisation comprenant la gamme d'usinage des pièces et la gamme d'assemblage.

Nous terminerons par une conclusion et des perspectives

# **1 Chapitre 1 : Étude bibliographique sur le soudage par friction malaxage FSW**



# Chapitre 1 : Etude bibliographique sur le soudage par friction malaxage FSW.

## 1.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons étudié le procédé de soudage par friction- malaxage et ce afin de nous familiariser avec ce procédé et répondre à toutes sortes de questions telle la présentation du procédé ; les paramètres du procédé ; les machines utilisées ; ... etc.

## 1.2 Principe du procédé FSW :

Le principe de ce procédé est de lier métalliquement (soudure) deux pièces en utilisant un outil à grande résistance thermique et mécanique qui est constitué d'un épaulement et un pion coaxial qui réalise le malaxage des deux parties de l'assemblage, ces dernières doivent être accolées et bien retenues (système de bridage) sur un support afin de contrer l'effort normal et les efforts générés par la combinaison d'un mouvement d'avance et de rotation de l'outil. Le procédé se décrit en trois phases principales (phase de plongée, phase de soudage et phase de retrait) et une phase secondaire (phase de préchauffage).[1]

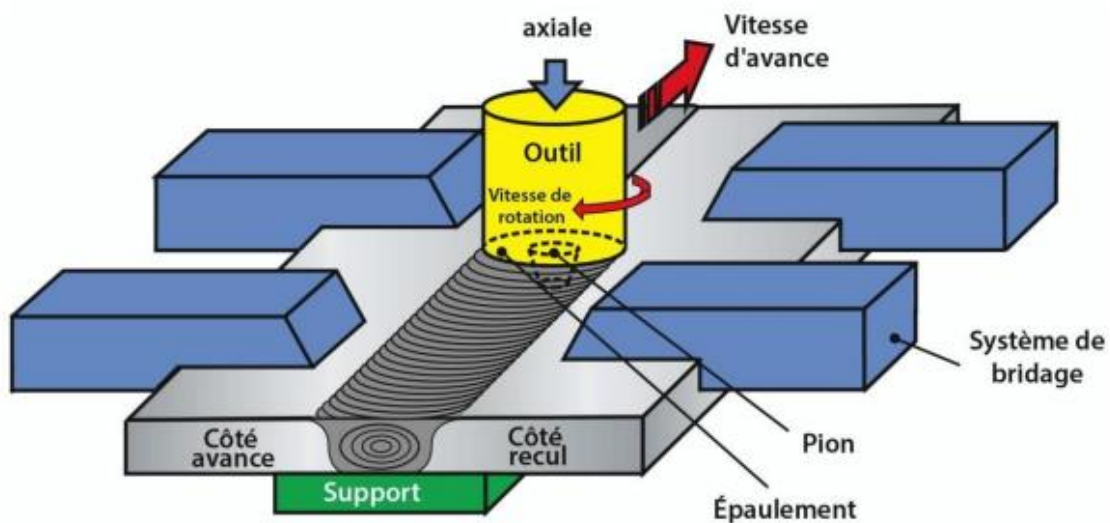


Figure 1-1: Illustration du FSW [1]

### 1.2.1 Phase de plongée (phase de la pénétration) :

- Dans cette phase l'outil est mis en rotation avec une fréquence  $\omega$  afin de permettre la pénétration progressive du pion à une profondeur optimale dans le plan de joint des deux pièces à souder sous l'effet d'un effort vertical jusqu'à amener l'épaulement en contact avec ces dernières. [2]

### 1.2.2 Phase de préchauffage (phase de stabilisation) :

- Durant cette étape transitoire l'épaulement reste à sa position pendant un temps de maintien appelé (dwell time) pour créer la quantité de chaleur suffisante pour provoquer un "ramollissement" du matériau (état pâteux) à la température requise.

### 1.2.3 Phase de soudage :

- Une fois la température de soudage atteinte, l'outil tournant est animé d'un mouvement de translation à vitesse constante dans la direction du joint représentant l'interface des deux pièces à souder avec une pression constante pour assurer le malaxage de la matière entre ces dernières. Cette matière malaxée est plastiquement déformée et constitue le cordon de soudure.[3]

Le cordon obtenu n'est pas symétrique. En effet, le mouvement combiné de rotation et d'avance donne naissance à deux côtés :

- Un côté avançant : c'est le côté de la soudure de l'outil rotatif qui se déplace dans la même direction que la direction de déplacement communément appelée "Advancing Side AS".[4]
- Un côté reculant : où la rotation de l'outil opposée à la direction de déplacement, est connue comme "Retreating Side RS".[4]

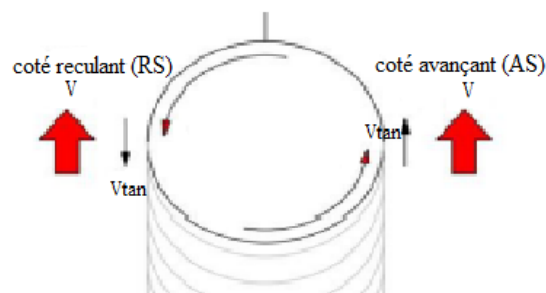


Figure 1-2 : Représentation du côté reculant et avançant [5]

### 1.2.4 Phase de retrait :

- En fin de soudage, l'outil est retiré du cordon, laissant apparaître un trou caractéristique laissé par le pion. Un outil à pion rétractable permet d'éviter la formation de ce trou, dans ce cas, l'épaulement reste en contact avec la matière jusqu'à la fin de retrait du pion.

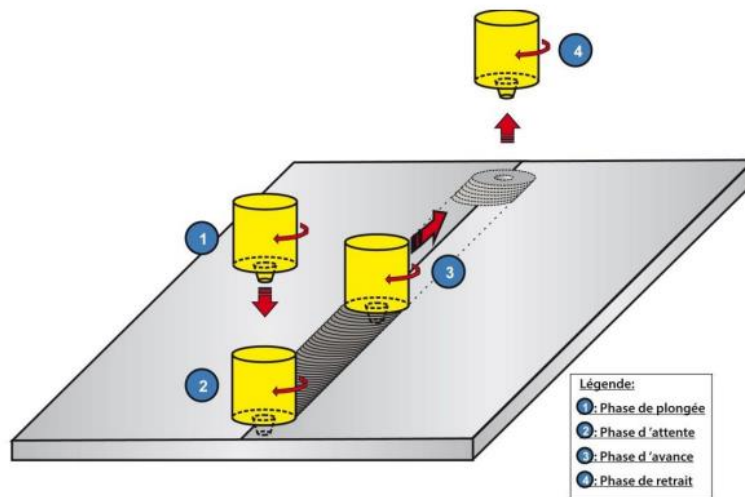


Figure 1-3: Les étapes du soudage FSW [1]

### 1.3 La microstructure :

#### 1.3.1 BM (métal de base) :

Situé loin du joint, le métal de base ne subit aucune déformation mécanique pendant le fonctionnement du soudage et les températures atteintes ne provoquent pas de modifications micro structurales. Il conserve ses propriétés mécaniques initiales.

#### 1.3.2 HAZ (zone affectée thermiquement) :

Comme le métal de base ne subit aucune déformation mécanique pendant le fonctionnement du soudage, les températures atteintes sont plus élevées, et génèrent des modifications microstructurales qui modifieront localement les propriétés mécaniques initiales.

#### 1.3.3 TMAZ (zone affectée thermo-mécaniquement) :

Située sous l'épaule de l'outil, cette zone est soumise à des températures élevées et à une déformation mécanique importante, due à l'écoulement de matière causé par le passage du pion de l'outil.

#### 1.3.4 SZ pépite de soudure (ou zone d'agitation) :

La zone d'agitation est la zone la plus affectée par les effets thermiques et mécaniques du processus. Vu en coupe, le noyau est facilement reconnaissable à sa microstructure entièrement recristallisée, l'interface entre la zone de pépite recristallisée et le métal parent est relativement diffuse et lisse sur le RS de l'outil, alors qu'elle est assez nette sur l'AS.

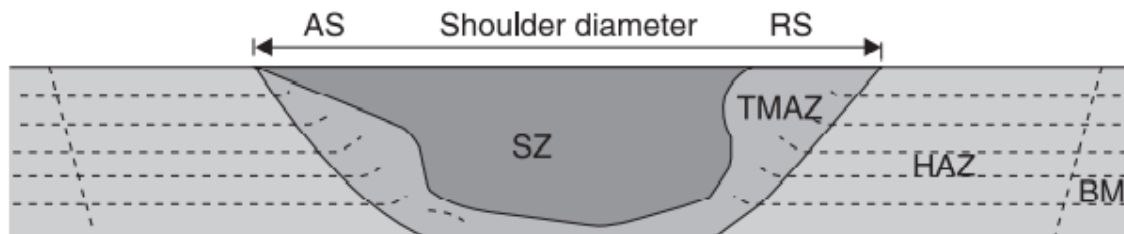


Figure 1-4 Schéma des zones microstructurales dans FSW [6]

(BM (base metal), HAZ (heat affected zone), TMAZ: Thermo- mechanically affected zone), SZ (stir zone), AS (Advancing Side), RS(Retreating Side)).



Figure 1-5 micrographie montrant les diverses zones [6]

## 1.4 Paramètres du soudage :

Plusieurs paramètres influencent le mouvement de la matière et les caractéristiques microstructurales et mécaniques de la soudure.

### 1.4.1 Les paramètres du procédé :

Le choix de ces paramètres est primordial car ils sont à régler selon les matériaux, l'épaisseur soudée et la géométrie de l'outil. L'ensemble conditionne l'apport d'énergie, le flux de matière, la formation du cordon, les propriétés mécaniques de l'assemblage et les efforts générés. [7]

#### 1.4.1.1 La Vitesse de rotation :

- (La rotation de l'outil  $\omega$  est exprimée en rotation par minute (rpm))

La rotation de l'outil entraîne le malaxage et le mélange de la matière autour du pion. Le choix d'une vitesse de rotation optimale est donc primordial. D'une part l'augmentation de la vitesse de rotation génère une température plus élevée en raison d'un échauffement par friction plus élevé et entraîne plus une agitation et un mélange intense du matériau qui va influencer sur la microstructure et provoque un élargissement simultané du noyau, d'autre part, une vitesse trop faible conduit à un chauffage insuffisant des pièces à souder, limitant

ainsi le malaxage de matière. Cela provoque alors la formation de bavures et de cavités dans la soudure [8].

#### 1.4.1.2 La Vitesse d'avance:

- (La vitesse d'avance de l'outil  $\gamma$ , en millimètre par min (mm/min))

La translation de l'outil déplace le matériau agité de l'avant vers l'arrière du pion et termine le processus de soudage. Lorsque la vitesse d'avance diminue, le temps de contact entre l'outil et la zone de soudage devient plus long ce qui augmente le taux d'échauffement dans cette zone, la matière devient plus malléable et son écoulement plus facile. Par conséquent, le noyau formé sera plus large. Lorsque la vitesse d'avance augmente, le contraire se passe, et l'apport de chaleur diminue. Par conséquent, le noyau formé sera moins large. Dans ce cas, on constate une augmentation du couple de rotation, car l'outil doit s'avancer avant que suffisamment de matière s'écoule de l'avant vers l'arrière. Un vide peut être formé dans le cordon de soudure et peut être qualifié de tunnel. [9]

Les deux vitesses sont liées par le rapport

$$\frac{\text{vitesse d'avance}}{\text{Rayon du pion} \times \text{vitesse de rotation}} \quad (1.1)$$

La soudure est dite chaude si ce rapport est faible, parce que le malaxage et la chaleur dissipée par frottement seront importants, ce qui générera des températures élevées.

En revanche, la soudure est considérée comme froide si ce rapport est grand, parce que la chaleur dissipée par frottement entre l'outil et les plaques ainsi que le malaxage de la matière ne causeront pas des températures très élevées dans les pièces. [10]

#### 1.4.1.3 L'angle d'inclinaison :

L'angle d'inclinaison est un paramètre très important à prendre en compte dans l'optimisation du procédé. Il est défini comme l'angle entre l'axe de l'outil et la ligne normale à la surface des plaques à souder. Ceci, affecte de manière significative le taux de génération de chaleur, le mouvement des matériaux et la consolidation du matériau qui s'écoule derrière le pion de l'outil. L'augmentation de l'angle d'inclinaison génère plus de chaleur grâce à la présence d'une force axiale importante ce qui améliore la plastification de la matière et rend le noyau de la soudure plus petit.

#### 1.4.1.4 Les efforts appliqués durant le soudage :

Dans ce procédé de soudage il existe deux forces qui influencent la nature du cordon final. La force de forgeage (effort normal) et la force de soudage (effort d'avance), ces forces sont directement liées à l'apport d'énergie généré par frottement entre l'épaulement et les surfaces des pièces à souder et aux déformations plastiques de la matière. Le choix de ces efforts conditionne le choix des vitesses de rotation et d'avance. D'une part un effort trop élevé augmente à la fois la température et la déformation plastique et cela entrainera

l'enfoncement de l'outil dans la matière, d'autre part un effort plus faible signifie une déformation plastique de la matière insuffisante qui va provoquer un défaut tunnel à l'arrière du pion.

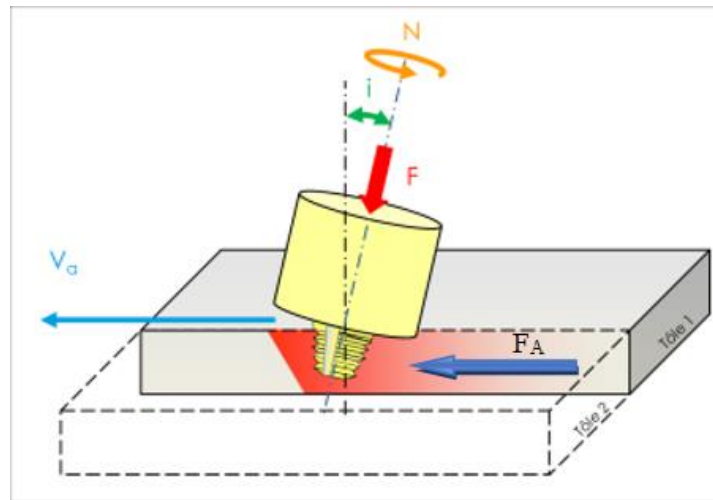


Figure 1-6 Les paramètres du procédé FSW [11]

#### 1.4.2 Les paramètres de l'outil :

La géométrie de l'outil est l'aspect le plus influent du développement de processus. Elle joue un rôle critique dans le flux de matériaux et régit à son tour la vitesse de rotation à laquelle le FSW peut être effectué.

L'outil du FSW de forme généralement enveloppe se compose de deux parties principales, la première c'est le pion qui plonge dans les pièces à souder à une profondeur bien déterminée afin de maintenir la deuxième partie de l'outil, l'épaule, en contact avec les pièces pour générer la chaleur nécessaire par frottement pour le malaxage.

L'uniformité de la microstructure et les propriétés mécaniques ainsi que les charges de processus sont régies par la conception de l'outil. Généralement une épaule concave et des pions cylindriques filetés sont utilisés afin de diminuer considérablement le glissement entre le matériau et l'outil et permet à la matière de glisser en bas pour une bonne qualité de soudure.

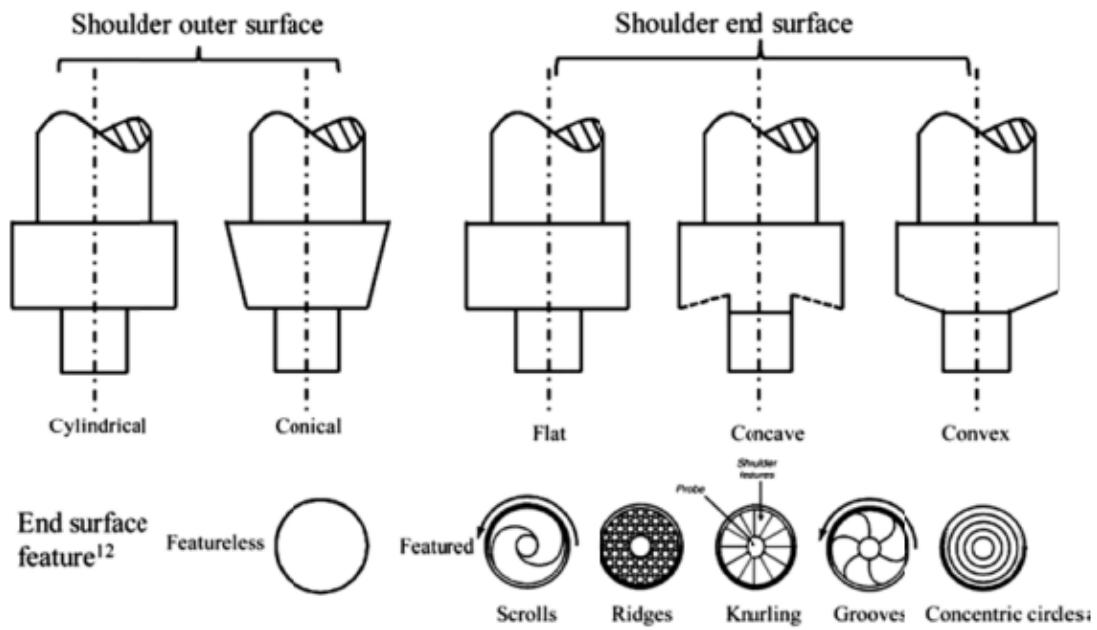


Figure 1-7 : différentes géométries et formes utilisées pour l'épaulement de l'outil [12]

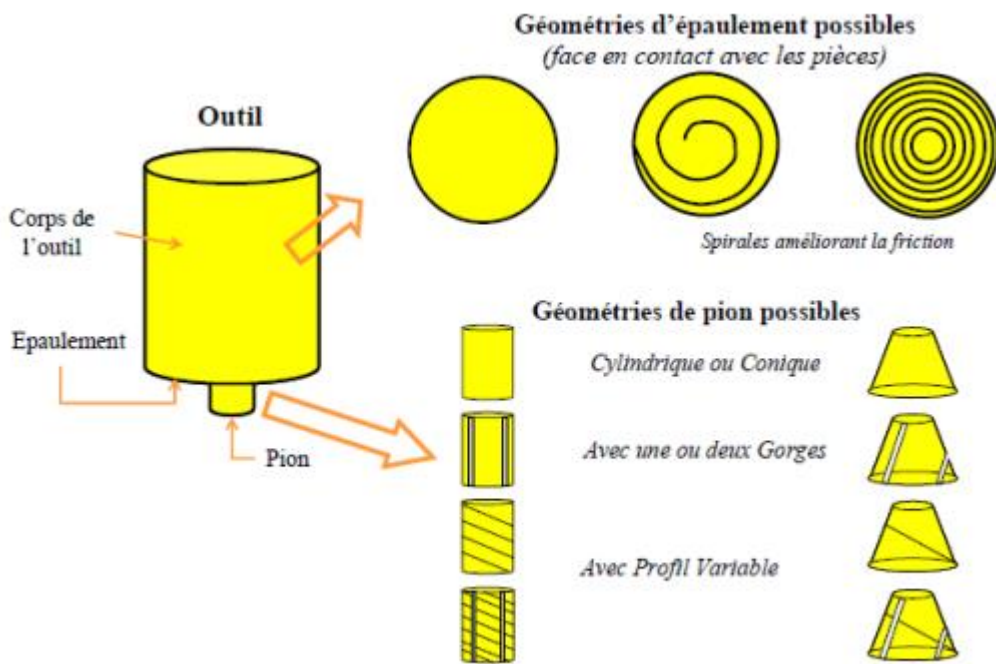


Figure 1-8 : synthèse des géométries et des formes utilisées pour le pion FSW [13]

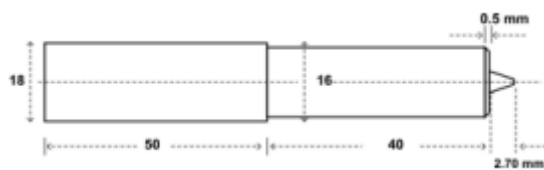


Figure 1-9 : Exemple de dimensions d'un outil pour le soudage des AA6351 [14]



## 1.5 Configurations de soudage :

Les différentes configurations possibles pour le soudage FSW sont présentées sur (la figure 5)

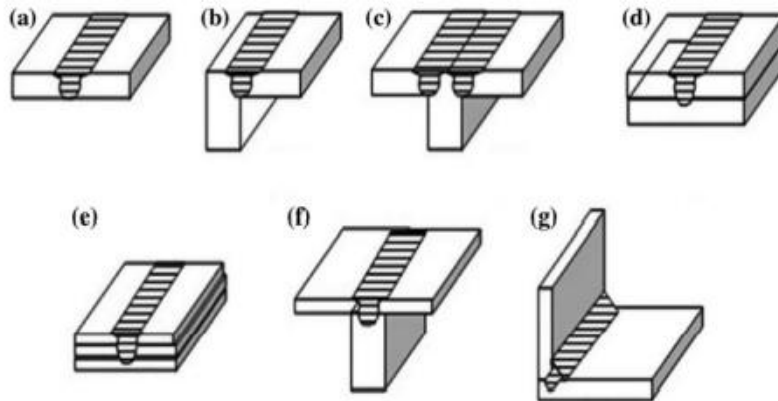


Figure 1-10 : Configurations de joints pour le soudage par friction malaxage : (a) bout à bout, (b) en coin, (c) en T, (d) transparence, (e) transparence multiple, (f) T par transparence, et (g) angle [15]

## 1.6 Matériaux de l'outil et des pièces à souder :

Le matériau de l'outil dépend essentiellement de l'épaisseur et du matériau des pièces à souder. Le tableau ci-dessous récapitule les matériaux d'outil couramment utilisés. Le choix du matériau dépend de sa résistance aux contraintes, aux températures générées durant le soudage, à la fatigue, il dépend aussi de son usinabilité.

Tableau 1-1 : Tableau des matériaux de l'outil couramment utilisés [13]

| Alliage                | Epaisseur | Matériau Outil                                    |
|------------------------|-----------|---|
| Alliages d'aluminium   | < 12 mm   | Acier à outil, WC-Co*                             |
|                        | < 26 mm   | MP159**   |
| Alliages de Magnésium  | < 6 mm    | Acier à outil, WC***                              |
| Cuivre et ses alliages | < 50 mm   | Alliage de nickel, PCBN****, alliage de tungstène |
|                        | < 11 mm   | Acier à outil                                     |
| Alliages de titane     | < 6 mm    | Alliage de tungstène                              |
| Acier inoxydable       | < 6 mm    | PCBN, alliage de tungstène                        |
| Acier faiblement allié | < 10 mm   | WC, PCBN  |
| Alliages de Nickel     | < 6 mm    | PCBN, alliage de tungstène                        |

WC-Co\* : Carbure de tungstène-Cobalt.

MP159\*\* : Alliage Nickel-Cobalt.

WC\*\*\* : Carbure de tungstène.

PCBN\*\*\*\* : Polycrystalline Cubic Boron Nitride.

## 1.7 Phénomènes physiques :

Durant le soudage, trois types de phénomènes physiques occurrent [10] :



### 1.7.1 Phénomène mécanique :

Deux phénomènes mécaniques se manifestent durant le soudage. Le contact entre l'outil en rotation et les pièces à souder génèrent des frottements qui sont caractérisés par une contrainte de cisaillement. La déformation plastique de la matière sous l'effet de la rotation de l'outil provoque la contrainte de cisaillement à l'interface et le malaxage dû à la forme du pion.

### 1.7.2 Phénomène thermique :

Au cours du soudage, la température de la pièce augmente. Cette augmentation est causée par la génération et la conduction de la chaleur. La chaleur générée est l'effet de la transformation de l'énergie mécanique en chaleur par l'intermédiaire des frottements entre outil et pièces, et de la déformation plastique du matériau. Cette chaleur se propage dans la pièce par conduction. La chaleur s'évacue de la pièce vers la plaque support par conduction ou vers l'air par convection.

### 1.7.3 Phénomène métallurgique :

Le procédé FSW provoque moins de modifications métallurgiques au sein de la matière contrairement aux procédés de soudage par fusion. Ces derniers présentent des modifications des propriétés mécaniques et de la microstructure des matériaux provoquant des concentrations de contraintes.

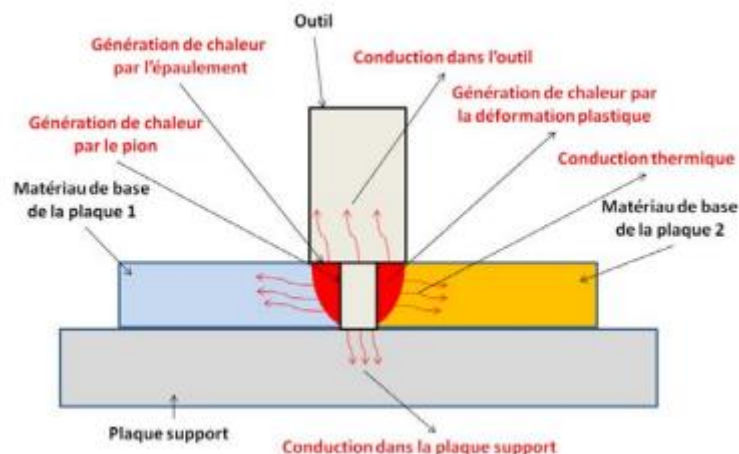


Figure 1-11 Transferts thermiques induits par le procédé FSW [10]

## 1.8 Les avantages du procédé FSW :

On peut résumer les avantages du procédé FSW dans les points suivants :

- Travail sur une large gamme d'épaisseurs.
- Pas de préparations spéciales sur les joints.

- Le soudage des matériaux dissemblables.
- Soudage en une seule passe sans la nécessité de la finition.
- Pas de métaux d'apport ni gaz de protection.
- Soudage des matériaux difficilement soudables avec d'autres procédés.
- Préservation de bonnes propriétés mécaniques.
- Procédé économique.
- Procédé automatisable.
- Procédé n'affectant pas l'environnement ni l'utilisateur.[9]

## 1.9 Les inconvénients du procédé FSW :

Les inconvénients du procédé FSW :

- Equipement encombrant.
- Bridage important afin d'assurer une bonne fixation des pièces.
- La présence d'un trou à la fin de soudage.
- Investissement initial important.[7]

## 1.10 Les machines industrielles utilisées pour le FSW :

### 1.10.1 Les fraiseuses modifiées :

Le processus de FSW est similaire en termes de principe de fonctionnement à d'autres procédés technologiques de fabrication tels que l'usinage, l'ébavurage, le meulage et le perçage. Fondamentalement, tous ces processus consistent à déplacer un outil rotatif à travers une pièce à usiner, produisant un entraînement du matériau qui constitue la pièce à usiner. Ainsi, il est plausible de supposer qu'une machine-outil conventionnelle, telle qu'une fraiseuse, puisse être utilisée pour effectuer le FSW. Elle est la première machine utilisée pour le FSW par Wayne Thomas. Les charges impliquées dans le FSW sont supérieures aux charges générées lors du processus de fraisage. Pour cette raison, les machines-outils conventionnelles doivent être renforcées afin d'augmenter leurs capacités de charge et de rigidité.[2]

#### 1.10.1.1 La méthodologie de conversion :

Il existe des opportunités potentielles de modifier l'équipement existant pour effectuer le soudage FSW. Les modifications de la machine peuvent être faites sur plusieurs niveaux : structurel, flexibilité, prise de décision et détection.

- **Structurel** : des modifications structurelles sont effectuées afin de rendre l'équipement plus robuste (certaines parties de l'équipement peuvent être remplacées telles que les voies, guides, rails, moteurs, broches, etc.).
- **La flexibilité** : La flexibilité peut être augmentée avec l'ajout de moteurs supplémentaires qui fournissent des degrés de liberté supplémentaires à l'équipement. En raison des charges élevées impliquées dans le processus FSW, la majorité des solutions ont mis en place un contrôle de la force pour prévenir les dommages

matériels et assurer la sécurité des personnes et pour obtenir une bonne qualité de soudure.

- **La prise de décision** : La prise de décision de l'équipement peut encore être améliorée en fournissant un mouvement dans plusieurs directions en même temps. De plus, la machine peut être équipée de plusieurs capteurs pour collecter différentes informations qui serviront au contrôle de l'équipement grâce à une solution de contrôle embarquée.

#### **1.10.1.2 Domaine d'application :**

Ces machines sont très populaires en raison du fait qu'elles sont largement utilisées dans l'industrie à des fins d'usinage, qui est l'un des procédés technologiques les plus couramment utilisés dans l'industrie. Les fraiseuses modifiées sont recommandées pour :

- Souder des pièces longues ou petites.
- Souder des pièces épaisses ou minces.
- Applications où une rigidité élevée est requise.
- Application mono ou multiaxes

#### **1.10.1.3 Les avantages :**

- Une bonne rigidité
- Une Fréquence de vibration faible
- Un Cout moyen

#### **1.10.1.4 Les inconvénients :**

- La capacité de fournir des vitesses de rotation et de déplacements constants [16]
- Elle n'offre pas de surveillance de charge ou de contrôle en effort.[16]
- Mauvaise résistance aux charges axiales et radiales demandées en FSW.



*Figure 1-12 : Fraiseuse adaptée pour le FSW [2]*

### 1.10.2 Les machines FSW dédiées :

Le développement de cette machine était spécialement pour le soudage avec friction malaxage. Ces machines permettent de souder en 2 ou 3 dimensions, elles permettent de souder avec un contrôle en effort ou en position. De même, selon la machine choisie, elles offrent la possibilité d'utiliser les trois technologies d'outil FSW. Certaines d'entre elles sont mêmes munies d'un dispositif de bridage intégré [10]. Elles sont conçues spécifiquement pour répondre aux exigences particulières du produit, par exemple les pièces pour ponts de navires. [17]

#### 1.10.2.1 Domaine d'application :

L'utilisation de machines FSW dédiées est recommandée pour les grandes séries de production des mêmes types de pièces que les machines-outils conventionnelles :

- Souder des pièces longues ou petites.
- Souder des pièces épaisses ou minces.
- Applications où une rigidité élevée est requise.
- Application mono ou multiaxes.

#### 1.10.2.2 Les avantages :

- La capacité de charge la plus élevée (elles peuvent appliquer des efforts axiaux pouvant aller jusqu'à 90kN). [16]
- Très grande rigidité.

#### 1.10.2.3 Les inconvénients :

- Des investissements très élevés (leur coût augmente avec l'augmentation en souplesse).
- Une faible productivité. [4]

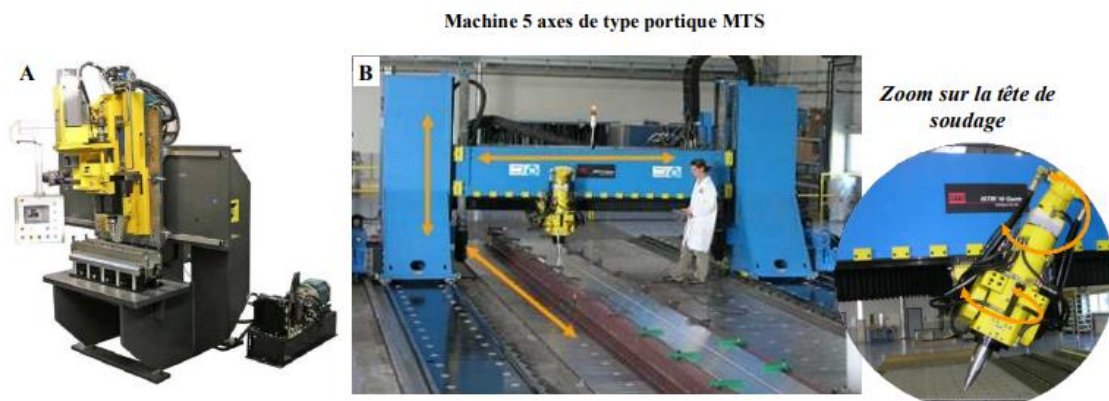


Figure 1-13 Exemple de machine dédiée au FSW. A- Machine ESAB Legio [2]

### 1.10.3 Les robots poly-articulés :

Les robots poly-articulés sont des machines amplement utilisées dans divers secteurs de l'industrie. On les retrouve dans la réalisation d'opérations de soudage par fusion, de palettisation, de peinture [2]

### 1.10.3.1 Domaine d'application :

L'utilisation de robots à bras articulés est recommandée pour :

- Matériaux relativement fins.
- Les applications comportant plusieurs soudures qui nécessiteraient autrement plusieurs configurations.
- Soudures bout à bout d'épaisseurs différentes (ébauches soudées sur mesure), ces types de soudures nécessitent à la fois un angle de déplacement et un angle de travail (plus de flexibilité est nécessaire).
- Applications à volume de travail plus élevé où la productivité est un facteur important.

### 1.10.3.2 Les Avantages :

- Une répétabilité et une flexibilité élevées.
- Une forte capacité de charge, pouvant transporter 500kg au bout de leur poignet.[2]
- Un volume de travail assez vaste.[2]
- Moins coûteux.

### 1.10.3.3 Les inconvénients :

- Une rigidité relativement faible.
- Conformité élevée, ce qui entraîne des problèmes de stabilité du processus.
- Forces de soudage limitées.



*Figure 1-14 Robot poly-articulé pour FSW de l'université de Coimbra [17]*

### 1.10.4 Les robots à architecture parallèle (Tricepts) :

Une machine parallèle est une structure mécanique composée de plusieurs chaînes qui agissent en parallèle, en coopération plutôt que l'une sur l'autre, comme dans le cas des manipulateurs en série ou des robots articulés. Le Tricept est une machine d'usinage utilisée

pour des applications de fraisage à grande vitesse. Ce module se compose de 5 degrés de liberté avec une répétabilité de 10 micromètres.[16]

#### **1.10.4.1 Application :**

- Trajectoires de soudage 3D.
- Des trajectoires linaires.
- Le soudage de matériaux de faible épaisseur à haute température.

#### **1.10.4.2 Les Avantages :**

- Les exigences de charge et de rigidité sont un peu plus élevées.
- Capable de créer des forces axiales très grandes.
- Une grande précision.

#### **1.10.4.3 Les inconvénients :**

- Un Coût plus élevé.
- Le volume de travail des pièces à usiner est relativement faible.
- Une plage d'orientation autorisée petite.



*Figure 1-15 Tricept TR805 utilisé en FSW [16]*

### **1.11 Conclusion :**

Après avoir présenté l'Etat de l'Art du procédé FSW et après avoir séparé les types de machines de soudage par friction malaxage FSW utilisées. Cette étude nous a permis de fixer notre choix sur la machine qu'on veut étudier dans le chapitre qui suit.

## **2 Chapitre 2 : Cahier des charges et solutions technologiques.**

## **Chapitre 2 : Cahier des charges et solutions technologiques.**

### **2.1 Introduction :**

Dans ce chapitre, on opte à présenter le cahier des charges de notre machine, les solutions technologiques choisies, les différents organes constituant la machine de soudage et son schéma cinématique.

### **2.2 Cahier des charges :**

#### **2.2.1 Fonction principale :**

Le but qu'on veut atteindre par cette étude consiste à concevoir et dimensionner une machine de soudage dédiée FSW à 3 axes. Destinée aux pièces planes en alliages d'aluminium de 6 mm d'épaisseur pour réaliser des jointes de soudure avec des trajectoires rectilignes et curvilignes.

#### **2.2.2 Les sous fonctions :**

Sous fonction 1 : source de mouvement.

Sous fonction 2 : transformation de mouvement.

Sous fonction 3 : guidage en translation.

Sous fonction 4 : Interaction entre l'outil et les pièces.

Sous fonction 5 : guidage en rotation (porte-outil).

Sous fonction 6 : les accouplements.

### **2.3 Source de mouvement :**

Cette source de mouvement a pour rôle de fournir l'énergie nécessaire pour assurer les quatre (04) mouvements de notre machine

Ces mouvements sont un mouvement de rotation de l'outil plus les trois mouvements de translation y compris le mouvement de pénétration suivant Z et les mouvements d'avance suivant x ou y pour les trajectoires rectilignes et suivant x et y pour les trajectoires curvilignes.

#### **2.3.1 La rotation de l'outil :**

Pour la rotation de l'outil on a deux choix, un moteur synchrone ou un moteur asynchrone.



### 2.3.1.1 Le moteur synchrone :

Il s'agit d'un moteur électrique à courant alternatif typique capable de produire des vitesses synchrones. Dans ce type de moteur, le stator et le rotor tournent à la même vitesse, réalisant ainsi la synchronisation. Le principe de fonctionnement de base est que, lorsque le moteur est connecté au secteur, l'électricité circule dans les enroulements du stator, produisant un champ électromagnétique tournant. Celui-ci est à son tour induit sur les enroulements du rotor qui commence alors à tourner.

Une source de courant continu externe est nécessaire pour verrouiller le sens de rotation et la position du rotor avec ceux du stator.[18]



Figure 2-1 moteur synchrone [19]

### 2.3.1.2 Le moteur asynchrone :

Le principe de fonctionnement des moteurs asynchrones est presque le même que celui des moteurs synchrones, sauf qu'il n'y a pas d'excitateur externe connecté dans lesquels le rotor ne reçoit aucune puissance électrique par conduction comme dans le cas des moteurs à courant continu.

La vitesse du rotor dépend de l'induction magnétique variable. Ce champ électromagnétique variable fait tourner le rotor à une vitesse inférieure à celle du champ magnétique du stator. Étant donné que la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique du stator varient. La différence de vitesse est connue sous le nom de "glissement". [18]



Figure 2-2 moteur asynchrone [20]

### 2.3.1.3 Pourquoi le choix du moteur asynchrone :

- Le moteur synchrone ne démarre pas directement, alors qu'un moteur asynchrone peut être démarré directement. [21]
- Une excitation courant continu externe est nécessaire pour que le moteur synchrone démarre, mais un moteur asynchrone ne nécessite aucune excitation externe pour fonctionner. [21]
- Il est moins cher, moins volumineux et moins compliqué que le moteur synchrone [22]
- Le moteur synchrone déclenche quand il dépasse le couple maximum, le moteur asynchrone ne le fait pas.
- Le moteur asynchrone est plus simple à entretenir et très résistant. [21]

### 2.3.2 Les moteurs pas à pas :

Les 3 mouvements de translation de notre machine sont assurés par 3 moteurs pas à pas

#### 2.3.2.1 Définition :

Le moteur pas à pas est un moteur à courant continu, c'est un système électromécanique qui transforme un signal électrique en un signal mécanique. Il est conçu pour accomplir un mouvement discret (notion de pas) et atteindre un positionnement précis. Ce dernier se compose d'une partie fixe (le stator) constituée de bobines alimentées cycliquement et d'une partie mobile (le rotor) constituée d'un matériau ferromagnétique ou d'aimants [23]



*Figure 2-3 moteur pas à pas [24]*

#### 2.3.2.2 Principe :

Les moteurs fonctionnent grâce à l'attraction d'une masse polaire (le rotor) par un champ magnétique. Chaque phase du stator reçoit tour à tour une impulsion électrique conventionnellement positive ou négative selon le sens du courant dans la bobine. Les impulsions arrivent dans un ordre prédéterminé de distribution et suivant une fréquence déterminée et réglable créant un champ magnétique qui attire le rotor pour tourner. Chacune de ces impulsions correspond à un déplacement angulaire appelé pas. Les moteurs les plus couramment rencontrés présentent des pas de :

- $0.9^\circ$  soit 400 pas par tour.

- 1.8° soit 200 pas par tour.
- 3.6° soit 100 pas par tour.
- 7.5° soit 48 pas par tour.
- 15° soit 24 pas par tour.[24]

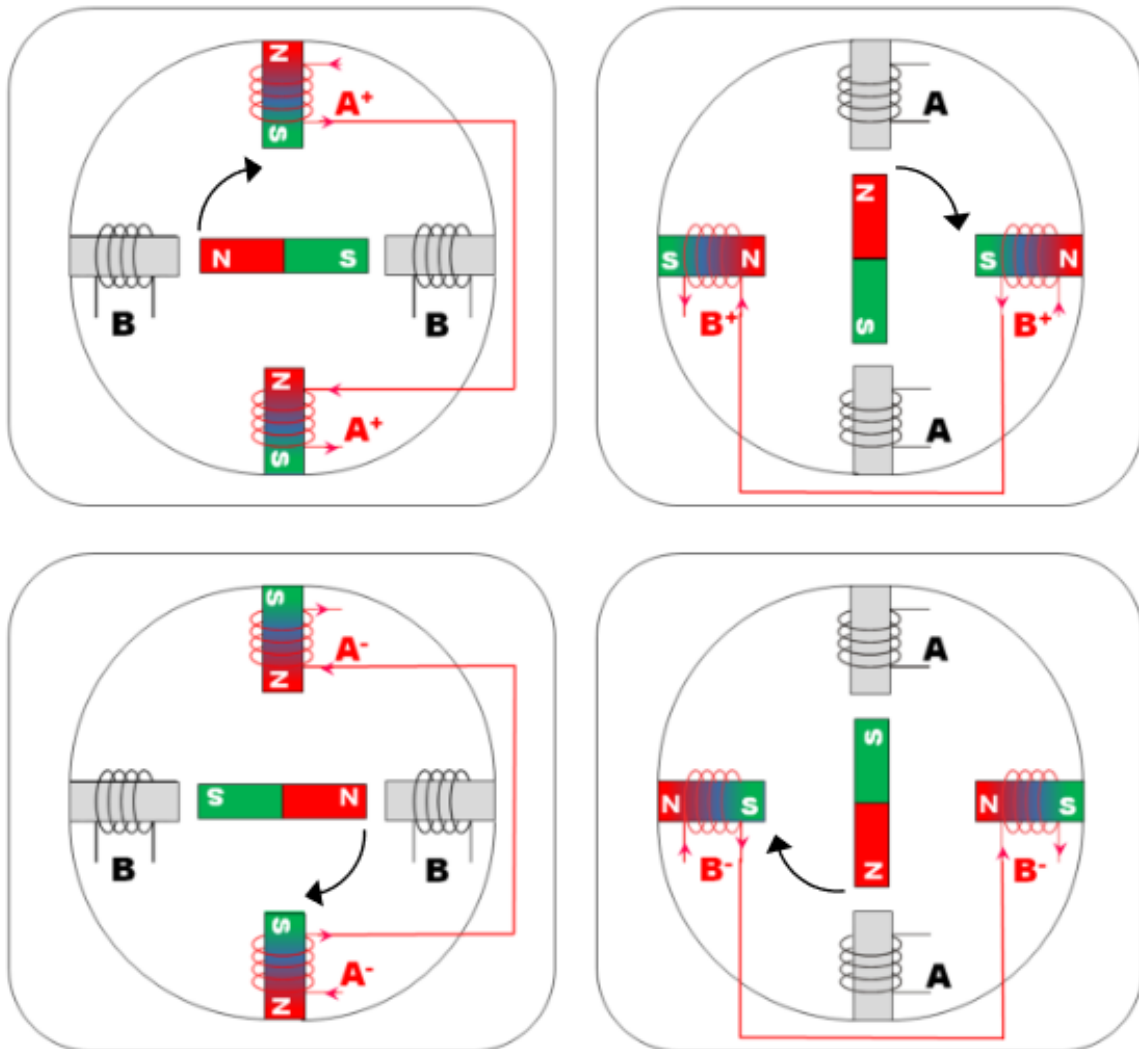


Figure 2-4 : Fonctionnement d'un moteur pas à pas à aimants permanents (configuration "monophasé"). [23]

### 2.3.2.3 Les types des moteurs pas à pas :

- Le stepper à aimant permanent (**PM**) est petit et est donc utilisé dans les applications où la taille est critique et la charge est petite. Les steppers PM ont un bon couple.
- Le stepper à réluctance variable (**VR**) offre une meilleure résolution de positionnement et précision, mais il a un couple faible.
- Les steppers **hybrides** combinent les meilleures caractéristiques des autres deux types de steppers. Ils fournissent un bon couple ainsi que la haute résolution souhaitable et précision. Le type le plus largement utilisé est le stepper hybride. [Cat4]

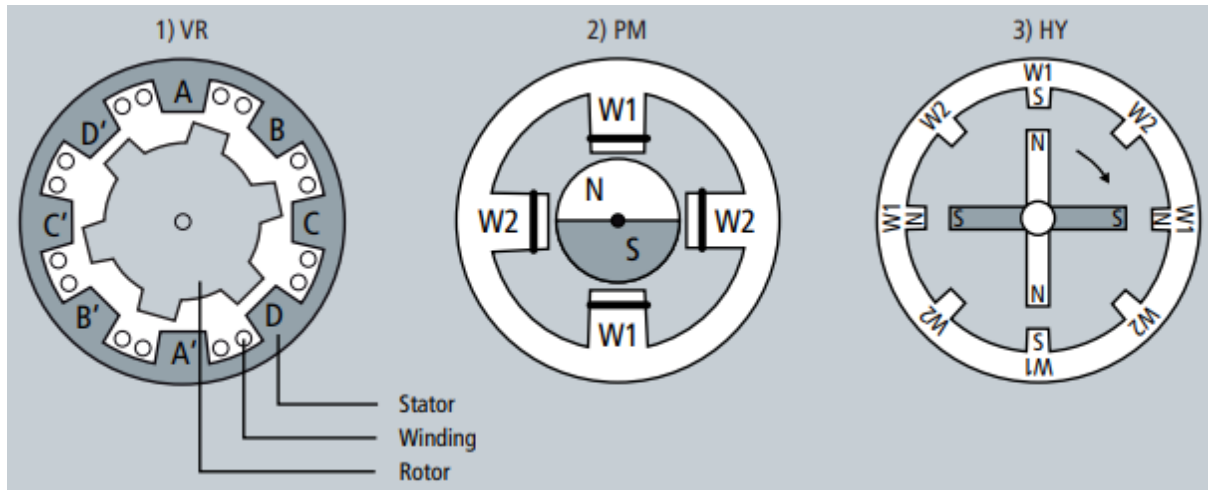


Figure 2-5 : Types de moteur pas à pas : moteur pas à pas à réluctance, moteur pas à pas à aimant permanent et moteur pas à pas hybride [25]

#### 2.3.2.4 Pourquoi le moteur pas à pas :

1. L'angle de rotation du moteur est proportionnel à l'impulsion d'entrée.
2. Le moteur a un couple complet à l'arrêt.
3. Positionnement précis.
4. Excellente réponse au démarrage/arrêt/marche arrière.
5. Très fiable car il n'y a pas de balais de contact dans le moteur.
6. moteur plus simple et moins coûteux à contrôler. [26]

### 2.4 Transformation de mouvement :

Les moteurs pas à pas utilisés fournissent un mouvement de rotation. La transformation de ce dernier en une translation peut être effectuée moyennant soit un système pignon crémaillère ou un système de vis à bille.

#### 2.4.1 Pignon et crémaillère :

La transformation de mouvement dans ce système vient de la rotation du pignon qui entraîne la translation de la crémaillère. Nous avons évité ce choix parce que :

- L'usure est rapide.
- Il nécessite une lubrification.
- Il nécessite un ajustement précis. [27]



Figure 2-6 système Pignon et crémaillère [27]

## 2.4.2 Vis à billes :

### 2.4.2.1 Définition :

Les vis à billes sont des actionneurs linéaires mécaniques constitués d'un arbre de vis et d'un écrou contenant des billes qui roulent entre leurs rainures hélicoïdales correspondantes, ces billes réduisent le contact mécanique à l'intérieur de l'assemblage de la vis et l'écrou et remplacent le frottement de glissement par le frottement de roulement. La fonction principale des vis à billes est de convertir le mouvement de rotation de la vis en mouvement linéaire de l'écrou. [28]

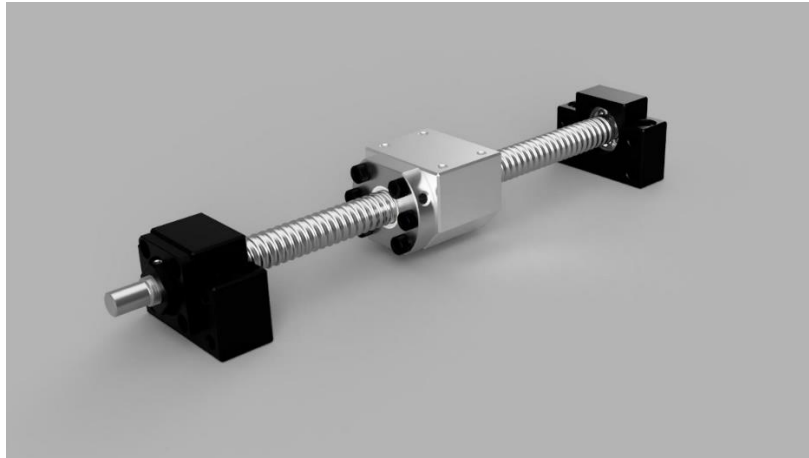


Figure 2-7 : vis à billes [28]

### 2.4.2.2 Principe :

Lorsque la vis ou l'écrou tourne, les billes sont déviées par le déflecteur dans le système de retour des billes de l'écrou et elles se déplacent à travers le système de retour jusqu'à l'extrémité opposée de l'écrou à billes dans un chemin continu. Les billes sortent ensuite du système de retour de billes dans les chemins de roulement de la vis à billes et de l'écrou en continu pour recirculer en circuit fermé. [29]



Figure 2-8 les composants d'une vis à billes [29]

### 2.4.2.3 Pourquoi le choix d'une vis à billes :

L'utilisation de vis à billes dans notre application de mouvement présente de nombreux avantages :

- Très efficace, nécessitant moins de couple, donc moteur plus petit.
- Grande précision de positionnement.
- Friction réduite - capable de fonctionner à des températures plus fraîches.
- Peut être ajusté pour augmenter/diminuer la précharge.
- Doit être remplacée moins souvent. [29]

## 2.5 Guidage en translation :

Pour Guider l'écrou dans son mouvement relatif par rapport à la vis on a besoin d'utiliser des glissières pour les 3 axes.

Il existe plusieurs types de guidages ayant des performances spécifiques :

- Les glissières à contact direct.
- Les Guidages par interposition d'éléments antifriction.
- Les glissières à éléments roulants. [30]

### 2.5.1 Les glissières à contact direct :

Les deux types majeurs de contact direct sont :

- **Guidages de type prismatique :**

Les guidages de type prismatique associent des surfaces de contact planes. Ils comportent un dispositif de réglage du jeu permettant de rattraper l'usure. En général on utilise des cales en matériau tendre. [Cat5]

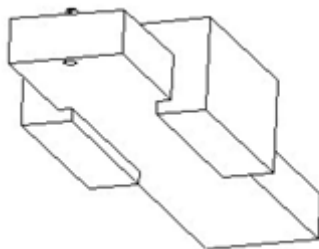


Figure 2-9 : guidage prismatique [Cat5]

- **Guidages par arbre ou moyeu coulissant :**

Les guidages par arbre ou moyeu coulissant, sont les solutions constructions qui associent une surface de contact cylindrique et un arrêt en rotation autour de l'axe de cette surface cylindrique. [Cat5]

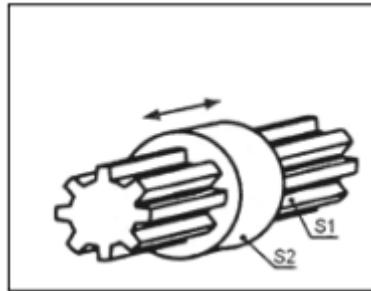


Figure 2-10 : guidage par arbre [Cat5]

- **Caractéristiques des glissières à contact direct :**

Malgré le cout faible de ce mécanisme de guidage on n'a pas voulu le choisir parce que ;

- Précision Moyenne, Dégradation par usure.
- Performances (vitesses, cadences, rendements) Faibles.
- Coefficient de frottement dans la liaison Elevé.
- Intensité des actions mécaniques supportées Faibles.
- Il nécessite une lubrification importante. [Cat5]

### 2.5.2 Guidages par interposition d'éléments antifriction :

L'interposition d'éléments antifriction entre les surfaces de liaison permet :

- De diminuer le coefficient de frottement.
- De reporter l'usure sur ces éléments interchangeables.

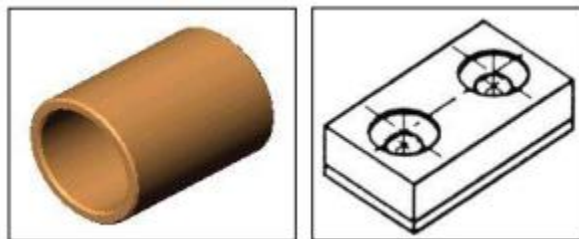


Figure 2-11 (a) Palier lisse monté serré. (b) Élément à visser [Cat5]

- **Caractéristiques Guidages par interposition d'éléments antifriction :**

Malgré le coût faible de ce mécanisme de guidage, on n'a pas voulu le choisir parce que ;

- Précision moyenne.
- Performances (vitesses, cadences, rendements) modérées.
- Coefficient de frottement dans la liaison moyen.
- Intensité des actions mécaniques supportées modérée. [Cat5]

### 2.5.3 Les glissières à éléments roulants :

Nos glissières sont constituées des arbres pleins lisses sur lesquels sont placés des roulements linéaires il existe plusieurs types :

### 2.5.3.1 Guidage de type R :

Les rails de guidage du type R peuvent être équipés de cages à billes ou à rouleaux. Ils sont capables de satisfaire des exigences moyennes voire élevées. [Cat5]



Figure 2-12 : guidage de type R [Cat5]

### 2.5.3.2 Guidage de type N/O :

Les rails sont équipés de cages à aiguilles capables de supporter des charges très élevées. Ils ont une très grande rigidité de guidage.[ Cat5]



Figure 2-13 : guidage de type N/O [Cat5]

### 2.5.3.3 Guidage type de L/M :

Ils sont prévus comme compléments aux rails N/O pour les guidages en appui libre. Ils sont équipés de cages à aiguilles. [Cat5]





Figure 2-14 Guidage type de L/M [Cat5]

- **Caractéristiques des glissières à éléments roulants :**

Malgré le coût élevé de ce mécanisme de guidage, nous l'avons choisi parce que ;

- Précision élevée.
- Performances (vitesses, cadences, rendements) élevée.
- Coefficient de frottement dans la liaison très faible.
- Intensité des actions mécaniques supportées élevée.

#### 2.5.3.4 Les roulements linéaire :

Les douilles à billes sont conçues pour fournir un support aux arbres à mouvement linéaire dans les machines mécaniques. Les douilles à billes traditionnelles consistent en un roulement tubulaire lisse avec des roulements à billes situés dans toute la paroi intérieure qui permettent un mouvement continu de l'arbre avec moins de frottement.

Les douilles à billes sont constituées de plusieurs éléments :

- d'une bague extérieure,
- d'une cage de guidage,
- de billes à roulement.[31]

#### Pourquoi ce choix :

- Supporte les charges radiales subies par les tiges
- Excellent rapport qualité-prix
- Longue durée de vie grâce aux différentes options d'étanchéité [32]

## 2.6 Outil :

Pour assurer un meilleur cordon de soudure FSW on a choisi un outil avec un pion démontable de l'apurement afin de pouvoir changer librement le pion dès son usure. La fixation du pion à l'outil se fait par une vis de pression. Cette dernière va permettre d'éviter certains degrés de liberté telle que la rotation entre le pion et l'épaule. La réalisation

d'une rainure dans la partie supérieure du corps du pion pour loger cette vis de pression est nécessaire.

L'épaulement de notre outil est de 18 mm de diamètre avec une surface plane afin d'assurer une meilleure génération de chaleur, le pion est conique lisse de base 6 mm et de 4 mm de bout avec une longueur de 5,4 mm afin d'éviter son enfoncement dans le socle durant le soudage.

Le choix de ces dimensions a pour but d'assurer un ratio of Tool ( $D/d = 18/6$ ) égal à 3 afin d'optimiser un meilleur malaxage de la matière. [33]

L'outil avec un pion conique lisse a montré son aptitude à souder des cordons sains avec un faible effort de forgeage et une vitesse d'avance de 200 mm/min. Généralement, les outils lisses sont utilisés avec des faibles vitesses d'avance afin de mieux entraîner et déformer la matière autour du pion ainsi reboucher les défauts de type tunnel. [34]

## 2.7 Le porte-outil :

Pour connecter l'outil avec l'accouplement de notre moteur on opte à utiliser un porte-outil qui contient des roulements à rouleaux coniques.

Les roulements à rouleaux coniques comportent des chemins de roulement à bagues intérieure et extérieure coniques avec des rouleaux coniques disposés entre eux, inclinés de sorte que la surface des rouleaux converge vers l'axe du roulement. Ces roulements peuvent supporter de grandes quantités de charges radiale et axiale.[35]

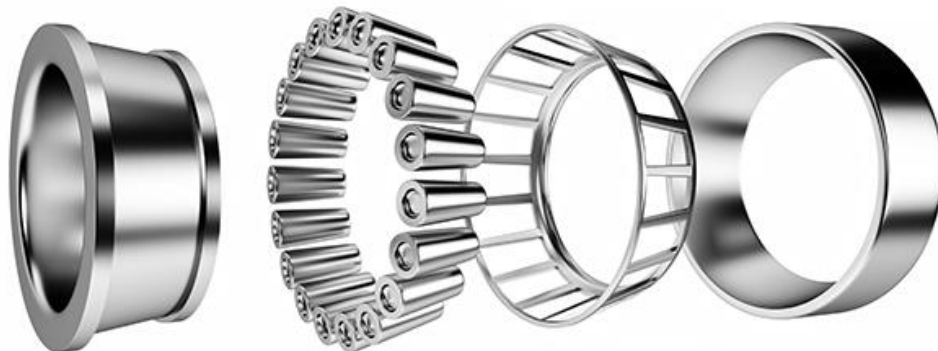


Figure 2-15 Vue éclatée d'un roulement à rouleaux coniques. De gauche à droite : chemin de roulement intérieur, éléments roulants, cage et chemin de roulement extérieur [35]

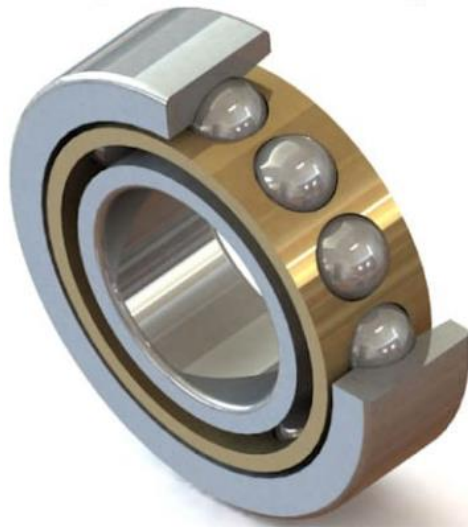
La forme inclinée et conique des roulements à rouleaux coniques minimise les contraintes causées par une combinaison de charges radiales et axiales. Les charges radiales et axiales se combinent souvent pour créer des charges différentes sur un ensemble de roulement. La capacité de gérer des charges angulaires et des charges angulaires variables rend les roulements à rouleaux coniques indispensables à diverses conceptions techniques et industrielles. La forme conique concentre essentiellement les charges radiales et axiales en une charge unifiée qui est plus facilement maîtrisée. Les charges angulaires pouvant être exploitées dépendent de l'angle précis du roulement conique. Les roulements coniques peuvent exploiter une gamme complète de forces en configurant deux ou même plusieurs.[35]

## 2.8 Roulement à bille :

Les roulements à billes sont des types de roulements à éléments roulants qui supportent des charges axiales, réduisent la friction et positionnent les pièces mobiles de la machine tout en facilitant le mouvement.

Les roulements à billes se composent de quatre parties principales qui sont : 2 bagues/courses, les billes (les éléments roulants) et le dispositif de retenue (le séparateur de billes).

Ils réduisent le contact de surface et la friction sur les plans en mouvement en utilisant deux "courses" ou bagues de roulement séparées, le coefficient de frottement est réduit par le mouvement de rotation des billes.[36]



*Figure 2-16 roulement à billes [36]*

## 2.9 Accouplements :

Les accouplements sont des composants mécaniques utilisés pour connecter deux arbres en ligne afin de permettre à un arbre d'en entraîner un autre à la même vitesse. Les accouplements peuvent être utilisés pour réduire les chocs et les surcharges, ce qui peut réduire l'usure de la machine et augmenter la durée de vie globale. Un accouplement peut être rigide ou flexible.[37]

### 2.9.1 Accouplement rigide :

Comme son nom l'indique, un accouplement rigide permet peu ou pas de mouvement relatif entre les arbres. Les ingénieurs préfèrent les accouplements rigides lorsqu'un alignement précis est nécessaire.

Une fois qu'un accouplement rigide est utilisé pour connecter deux arbres d'équipement, les arbres ces derniers agissent comme un seul arbre. Les accouplements rigides trouvent une utilisation dans les applications verticales, telles qu'une pompe verticale.[38]



Figure 2-17 : accouplement rigide. [39]

### 2.9.2 Accouplement flexible :

Tout accouplement d'arbre qui peut permettre un certain degré de mouvement relatif entre les arbres constitutifs est appelé accouplement flexible.

Il peut réduire l'usure des machines par les défauts et la dynamique qui font partie de presque tous les systèmes. [38]










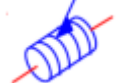
Figure 2-18 accouplement flexible [39]

### 2.10 Liaisons mécaniques et schéma cinématique :

Tout élément ou organe de la machine connecté à un ou plusieurs autres éléments forme une liaison mécanique. Le tableau suivant résume l'ensemble des liaisons utilisées dans cette machine et leurs présentations normalisées selon la norme NF EN ISO 3952-1. A noter que la solution technologique qui permet de réaliser ces liaisons diffère d'un cas à un autre en fonction des considérations et des contraintes présentées dans la réalité.

Tableau 2-1 : Schémas des liaisons mécaniques.

| Liaison      | Schéma plan | Schéma espace |
|--------------|-------------|---------------|
| Encastrement |             |               |
| Glissière    |             |               |

| Liaison        | Schéma plan   | Schéma espace   |
|----------------|---|---|
| Appui plan     |  |  |
| Pivot glissant |  |  |
| Pivot d'axe    |  |  |
| Hélicoïdale    |  |  |

Le schéma cinématique est un moyen de présentation simplifié d'un mécanisme réel sans prendre en compte sa géométrie (Formes et dimensions). Le but de cette présentation est de bien comprendre le fonctionnement du système et les mouvements possibles entre ses éléments. La figure 2.2 suivant représente le schéma cinématique de la machine FSW.

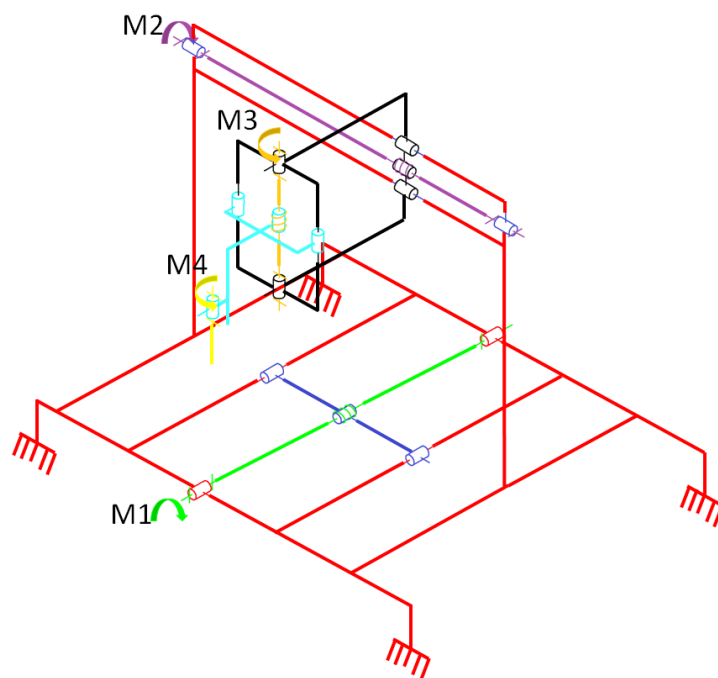


Figure 2-19 : Schéma cinématique de la machine FSW.

Dans ce schéma, M1, M2, M3 et M4 représentent les emplacements des moteurs.

Pour la même couleur, on a présenté tous les éléments qui sont rigides entre eux. Le châssis et tous les organes fixes sont présentés en rouge. Cette présentation n'est pas nécessaire étant donné que c'est un schéma cinématique, mais on a préféré de la faire pour visualiser le positionnement des éléments en mouvement. Les vis à billes suivant les axes X, Y et Z sont présentées en vert, violet et orange respectivement. Les éléments en translation suivant les axes X, Y et Z sont présentés en bleu, noir et bleu clair respectivement. L'outil est présenté en jaune.

## **2.11 Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a présenté l'objectif de ce projet et les solutions prises afin de répondre au besoin.

## **3 Chapitre 3 : Conception des éléments de la machine.**

## Chapitre 3 : Conception des éléments de la machine.

### 3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on va présenter la démarche qu'on a suivie afin de concevoir la machine, en traduisant les solutions présentées dans le chapitre 2 vers un modèle 3D en utilisant un outil de CAO.

### 3.2 Outil de la CAO :

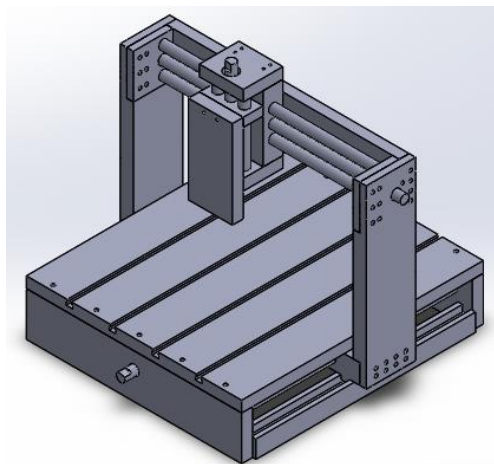
Dans le cadre de ce projet, on a employé un outil de conception assistée par ordinateur qui est le logiciel SolidWorks. La CAO est un ensemble de logiciels qui permet d'effectuer des conceptions, des simulations et des tests vertueux. La CAO est un outil qui permet de faciliter la tâche aux ingénieurs lorsqu'il s'agit de la conception des systèmes complexes qui sont difficilement suivis par l'être humain.

### 3.3 Démarche de la conception :

Dans un travail de conception, il n'existe pas de méthodes directes qui peuvent convertir les idées d'un ingénieur à un système final qui répond à toutes les exigences et sans défaillances, mais plutôt une amélioration continue d'un système en fonction de :

- L'objectif à atteindre et les besoins à répondre.
- Les procédés de fabrication existants.
- L'esprit de l'innovation et de l'invention.

On peut projeter cela sur la conception de la machine de soudage par le procédé FSW. Dans un premier temps, on a effectué une recherche sur les efforts de soudage de l'aluminium à partir des travaux des chercheurs qui ont fait des expériences sur le procédé FSW. On a pensé à une structure où la table serait fixe et l'outil possède les trois mouvements de translation.



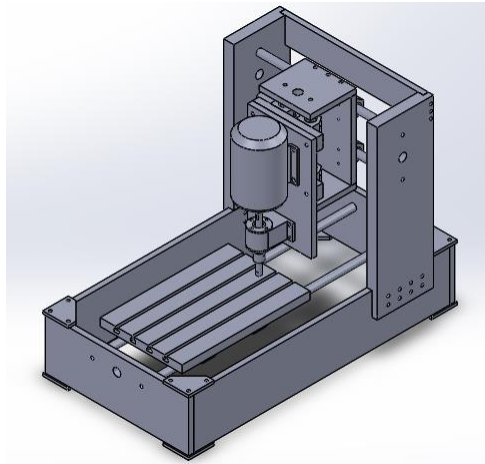
*Figure 3-1 : Première conception.*



Cette structure est instable. Aussi, le moteur nécessaire pour faire mouvoir l'ensemble selon la direction X devrait être très puissant.

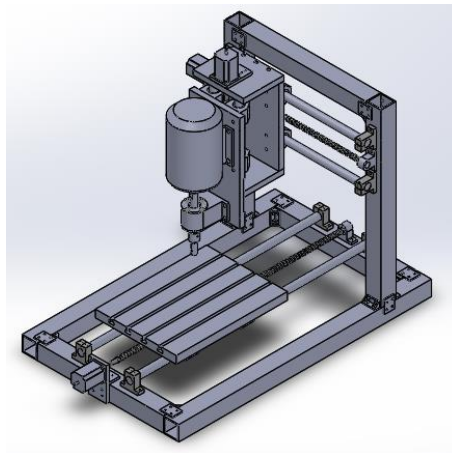
On a envisagé à rendre la table mobile.

En plus, en se basant sur le retour d'expérience des manipulations faites par l'enseignant Mr. BOUAROUDJ et ses étudiants, de la faculté de mécanique à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene [39], les efforts de soudage sont beaucoup plus faibles par rapport à ce qu'on a estimé précédemment. Donc, on a opté pour la diminution des épaisseurs des différentes pièces de la machine.



*Figure 3-2 : Deuxième conception.*

Si on considère l'aspect de la fabrication et de la réalisation de chacune des pièces, on peut conclure que cette deuxième conception est difficile à réaliser et peut coûter cher en matière première seulement. Pour remédier à cela, on remplace les tôles épaisses par des profilés carrés qui résistent bien aux efforts, qui coûtent moins cher et qui sont faciles à manipuler lors de la réalisation ou de l'assemblage.



*Figure 3-3 : Troisième conception.*

Pour rendre le châssis plus rigide, on a préféré de le réaliser en structure mécano-soudée.

On a changé aussi la table de travail, au lieu des rainures, on a prévu des trous taraudés. Ce choix est justifié par le fait que l'usinage des rainures est plus difficile que la réalisation des trous taraudés.

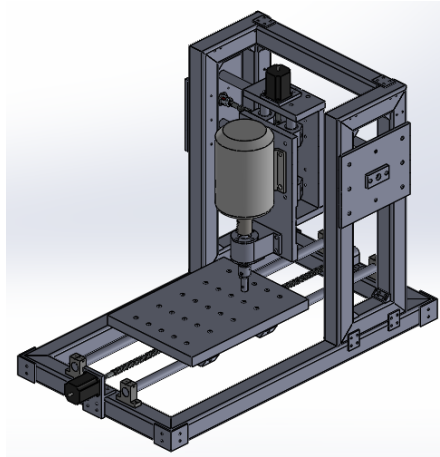


Figure 3-4 : Quatrième conception.

Bien sûr, il n'existe pas de conception finale, et cette quatrième conception peut être améliorée. Mais, dans le cadre de ce projet, on s'est arrêté ici.

### 3.4 Etapes de conception :

#### 3.4.1 Conception du châssis :

Le châssis est constitué d'une traverse et de trois (03) cadres mécano-soudés renforcés par des goussets de coin intérieurs ou extérieurs. Tous ces éléments sont faits en profilés carrés de dimensions 60×60×4, et leur assemblage est assuré à l'aide des goussets plats.

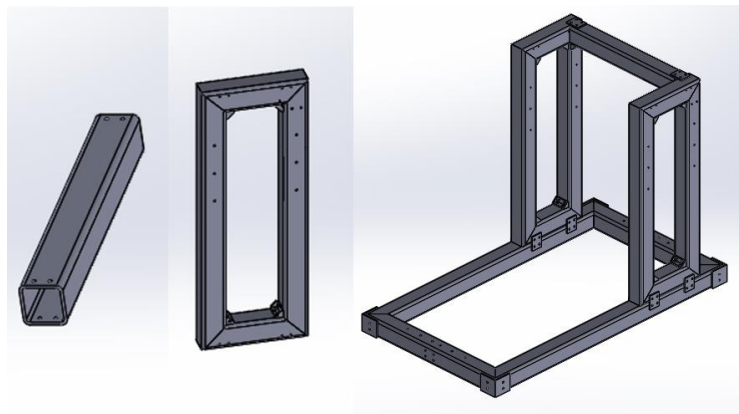


Figure 3-5 : Profilé carré, cadre mécano-soudé et châssis.

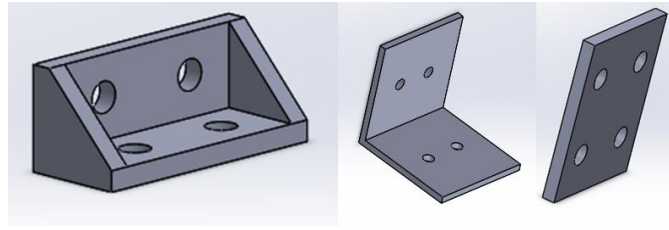


Figure 3-6 : Goussets : de coin intérieur, de coin extérieur et plat.

### 3.4.2 Conception de l'axe X :

L'axe X consiste en une table de travail supportée par des paliers à roulements linéaires. Les roulements roulent sur deux tiges de guidage fixées des deux côtés par des supports d'axe. Le mouvement de translation de la table est assuré par le mécanisme de vis à billes. Cette dernière est supportée par un palier à roulement à billes à contact radial. L'arbre du moteur pas à pas est accouplé à la vis à billes moyennant un accouplement flexible. Le moteur est fixé sur une bride montée au châssis.

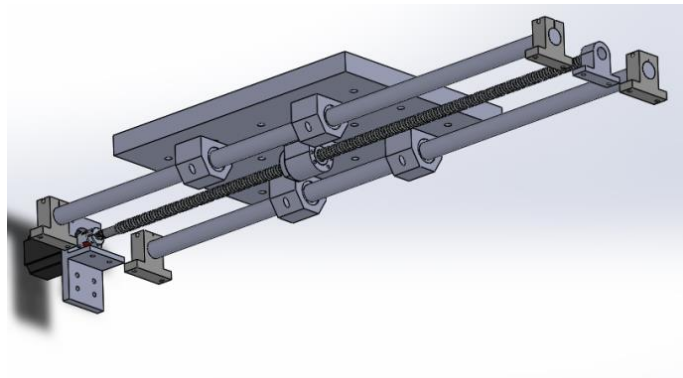


Figure 3-7 : Conception de l'axe X.

### 3.4.3 Conception des axes Y et Z :

Pour l'axe Y, les différents organes sont supportés sur les deux côtés par deux plaques fixées sur le châssis. La vis à billes fait translater une plaque qui supporte les éléments de l'axe Z et l'axe de rotation (Outil, porte-outil et moteur asynchrone).

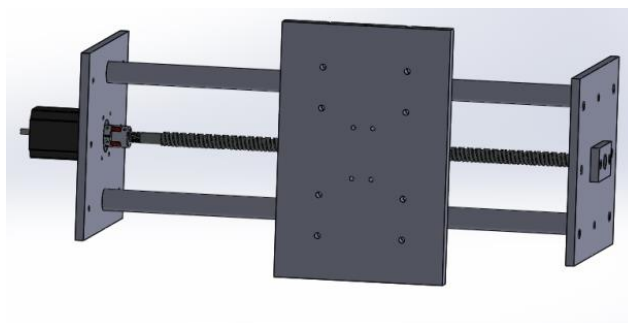
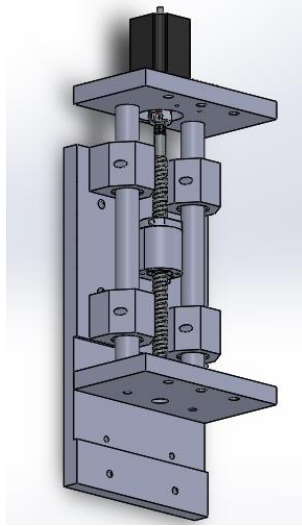


Figure 3-8 : Conception de l'axe Y.



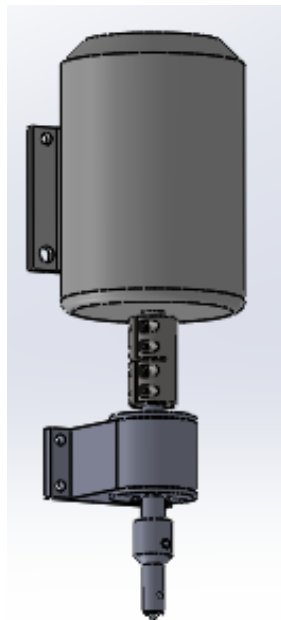
*Figure 3-9 : Conception de l'axe Z.*

L'axe Z n'est pas différent.

Contrairement aux tiges de guidage de l'axe X, les tiges des axes Y et Z sont logées dans des trous non débauchants dans les plaques et vissées de l'autre côté.

#### **3.4.4 Conception de l'axe de rotation :**

L'axe de rotation est constitué du moteur asynchrone, du palier-porte-outil et de l'outil. La transmission du mouvement de l'arbre moteur vers l'outil se fait par l'intermédiaire de l'arbre-porte-outil. Ce dernier est connecté à l'arbre moteur par un accouplement aux clavettes. L'outil est assuré dans sa position par une clavette et une vis de pression.



*Figure 3-10 : Conception de l'axe de rotation.*

### 3.4.5 Conception du palier-porte-outil :

L'arbre porte-outil encaisse des charges axiales significatives. Dans ce cas, on a employé des roulements à rouleaux coniques pour guider l'arbre en rotation. Les roulements sont montés en X.

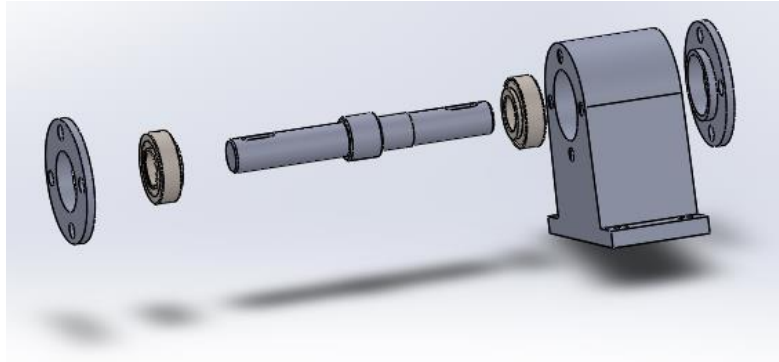


Figure 3-11 : Vue éclatée du palier-porte-outil.

### 3.4.6 Conception de l'outil :

On conçoit un outil dont le pion est remplaçable. Le pion est fixé à sa position dans le corps de l'outil à l'aide d'une vis de pression.

Le corps de l'outil est monté dans l'arbre-porte-outil. Le mouvement relatif entre ces deux derniers est éliminé à l'aide d'une clavette et une vis de pression.

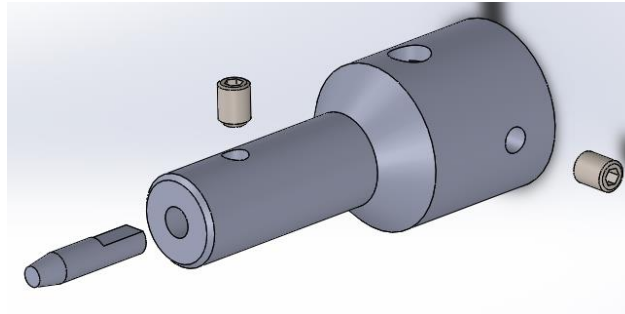


Figure 3-12 : Vue éclatée de l'outil.

### 3.4.7 Conception du moyen de fixation des pièces :

La fixation des pièces à souder est assurée par des brides et des vis. Le bridage se fait en plusieurs étapes. On commence par mettre les pièces à souder sur une pièce de support. Cette dernière doit avoir un bon état de surface pour la face en contact avec les pièces à souder en les permettant d'éviter de s'y coller. Deuxièmement, on improvise une cale ayant une même hauteur qu'on met à la proximité. On place la bride d'une façon qu'elle appuie sur la pièce à souder et la cale, puis on serre la vis à tête hexagonale dans l'un des trous taraudés réalisés sur la table de travail.

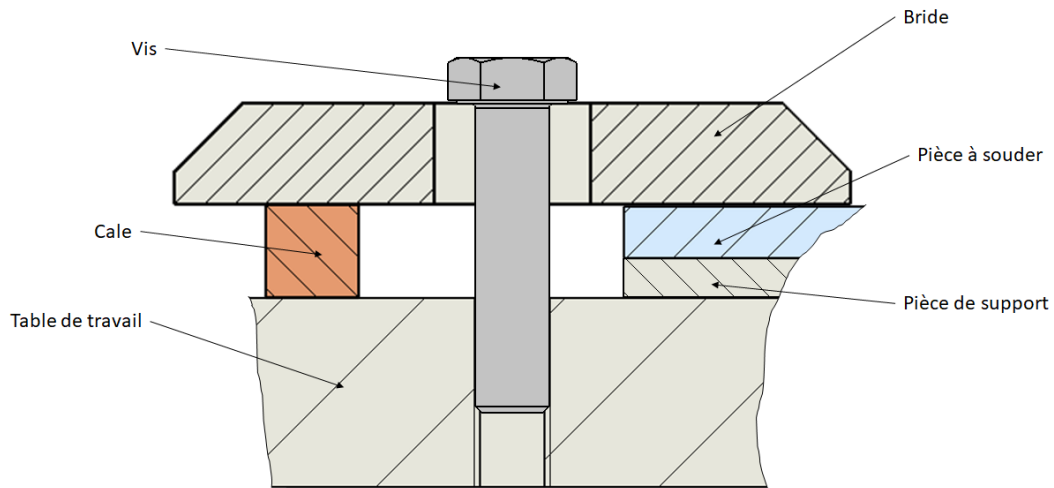


Figure 3-13 : Système de fixation des pièces à souder.

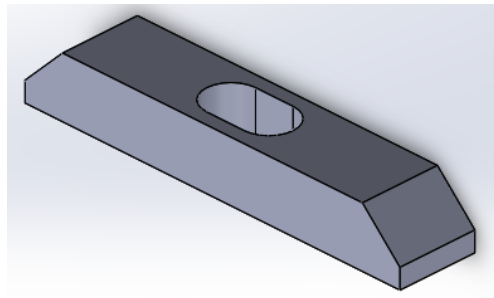


Figure 3-14 : la bride.

### 3.5 Bilans de la machine :

#### 3.5.1 Bilan des pièces à usiner :

Le ‘nom du fichier’ correspond au nom du fichier SolidWorks.

Table 3-1 : Liste des pièces à usiner.

| Nom du fichier   | Nom de la pièce           | Description/Désignation             | Quantité |
|------------------|---------------------------|-------------------------------------|----------|
| Bride Plate      | Bride de fixation         | Acier de construction               | 4        |
| Pion             | Pion                      | Acier à outil X39CrMoV5             | 1        |
| Epaulement       | Corps de l’outil          | Acier à outil X39CrMoV5             | 1        |
| Arbre            | Arbre-porte-outil         | Acier C45                           | 1        |
| Bride            | Bride                     | Acier C45                           | 2        |
| Logement         | Logement                  | Acier C45                           | 1        |
| Châssis Bas      | Cadre du châssis bas      | Acier E295/Profilé carré<br>60×60×4 | 1        |
| Châssis Vertical | Cadre du châssis vertical | Acier E295/Profilé carré<br>60×60×4 | 2        |
| Traverse         | Traverse                  | Acier E295/Profilé carré<br>60×60×4 | 1        |
| Gousset          | Gousset du coin intérieur | Acier de construction               | 10       |

| Nom du fichier                | Nom de la pièce               | Description/Désignation | Quantité |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|----------|
| Gousset C                     | Gousset du coin extérieur     | Acier de construction   | 4        |
| Gousset P                     | Gousset plat                  | Acier de construction   | 10       |
| Logement Douille vis à billes | Logement douille vis à billes | Acier C45               | 3        |
| Palier roulement X            | Palier roulement X            | Acier C45               | 1        |
| Palier roulement Y            | Palier roulement Y            | Acier C45               | 1        |
| Plaque G                      | Plaque gauche                 | Acier de construction   | 1        |
| Plaque D                      | Plaque droite                 | Acier de construction   | 1        |
| Plaque 1                      | Plaque arrière                | Alliage d'aluminium     | 1        |
| Plaque 2                      | Plaque haute                  | Alliage d'aluminium     | 1        |
| Plaque 3                      | Plaque basse                  | Alliage d'aluminium     | 1        |
| Plaque 4                      | Plaque avant                  | Alliage d'aluminium     | 1        |
| Porte Moteur SX               | Bride moteur X                | Acier C45               | 1        |
| Porte Moteur SZ               | Bride moteur Z                | Acier C45               | 1        |
| Table                         | Table de travail              | Alliage d'aluminium     | 1        |
| Tige Glissière Y              | Tige glissière Y              | Acier allié inoxydable  | 2        |
| Tige Glissière Z              | Tige glissière Z              | Acier allié inoxydable  | 2        |

### 3.5.2 Bilan des accessoires :

Table 3-2: Liste des pièces à acheter.

| Nom du fichier                 | Nom de la pièce                          | Description/Désignation                                     | Quantité |
|--------------------------------|--|---|----------|
| 19mm Shaft Coupling            | Accouplement rigide                      | Accouplement rigide-19×76                                   | 1        |
| hex bolt gradeab_iso           | Vis à tête hexagonale                    | Vis à tête hexagonale ISO 4014-M12×50                       | 4        |
| Moteur A                       | Moteur asynchrone                        | Moteur asynchrone triphasé 1,1kW-3000tr/min, type-083-2, B3 | 1        |
| Moteur S                       | Moteur pas à pas                         | Nema 23-57HS7630B4D8  | 3        |
| Acoplamento Jaw 8x10 d=25 L=30 | Accouplement flexible                    | Accouplement flexible-8×10×30                               | 3        |
| -                              | Vis de pression                          | Vis sans tête à six pans creux à bout plat ISO 4026-M8×10   | 2        |
| -                              | Roulement à rouleaux coniques            | Roulement à rouleaux coniques SKF d=20, D=42                | 2        |
| Douille 16mm                   | Douille vis à billes                     | Douille d=16  | 3        |
| -                              | Roulement à billes                       | Roulement à billes SKF d=10, D=26                           | 3        |
| Roulement Linéaire             | Palier roulement linéaire                | Roulement linéaire LUJR 25                                  | 12       |
| SK25 SHAFT HOLDER              | Support d'arbre linéaire                 | Support d'arbre linéaire SK25                               | 4        |
| Tige GlissièreX/Y/Z            | Tige glissière X/Y/Z                     | Tige acier inoxydable d=25                                  | 6        |
| Vis à bille X/Y/Z              | Vis à bille X/Y/Z                        | Vis à bille d=16, p=5                                       | 3        |
| -                              | Clavette                                 | Clavette parallèle, forme A, 6×6×20, NF E 22-177.           | 2        |
| -                              | Vis à tête cylindrique à six pans creux. | Vis à tête cylindrique à six pans creux ISO 4762-M6         | /        |
| -                              | Vis à tête cylindrique à six pans creux. | Vis à tête cylindrique à six pans creux ISO 4762-M8         | /        |
| -                              | Vis à tête cylindrique à six pans creux. | Vis à tête cylindrique à six pans creux ISO 4762-M12        | /        |

### 3.5.3 Bilan de la machine :

*Table 3-3 : Bilan de la machine.*

|                                       |              |
|---------------------------------------|--------------|
| <b>Encombrement</b>                   | 1000×572×760 |
| <b>Espace de travail hypothétique</b> | 440×252×85   |
| <b>Poids estimé</b>                   | 160kg        |

### 3.6 Conclusion :

Ce chapitre a porté sur les différentes étapes de la conception qu'on a suivie, des listes des pièces à usiner et celles à acheter. Les dimensions des éléments critiques sont justifiées dans le chapitre 4.



## **4 Chapitre 4 : Dimensionnement des différents éléments de la machine.**

## Chapitre 4 : Dimensionnement des différents éléments de la machine.

### 4.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on va effectuer les calculs et les simulations nécessaires dans le but de dimensionner les organes critiques de la machine et vérifier les critères de résistance.

### 4.2 Choix des moteurs :

Le choix d'un moteur pour une installation ou un dispositif quelconque est une étape critique. Quand il s'agit de soudage par le procédé FSW, une faible puissance du moteur qui entraîne l'outil de soudage peut causer à ce dernier de se coller aux pièces à souder durant l'opération. Contrairement, si on opte à utiliser un moteur d'une puissance élevée, la conception serait modifiée du fait que les moteurs à grandes puissances prennent plus de place et pèsent plus lourd.

Comme il était déjà annoncé dans le deuxième chapitre, on utilise deux types de moteurs, un moteur asynchrone et des moteurs pas-à-pas. Dans cette partie, on va calculer les puissances et les couples nécessaires pour le fonctionnement de la machine, puis on se réfère au marché algérien pour choisir les produits qui conviennent.

#### 4.2.1 Calcul de la puissance du moteur asynchrone :

L'outil, lors de son contact avec les pièces à souder, subit un couple résistant à sa rotation. Ce couple est dû aux frottements engendrés par le contact solide-solide. Le rôle du moteur asynchrone est de surmonter ce couple.

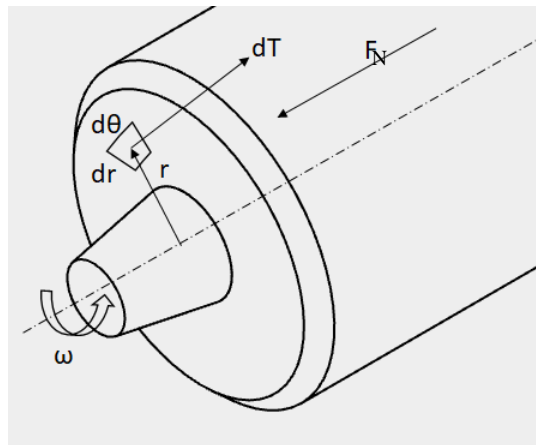


Figure 4-1 : Schématisation des différentes forces appliquées sur l'épaulement.

Considérant la forme de l'outil (*figure 4.1*), les frottements sont générés au niveau de l'épaule et du pion. Mais, en se basant sur le travail de HADJI et EL FERTAS dans leur projet de fin d'étude [39], le couple résistant dans le pion peut être négligé devant celui de l'épaule. Ainsi, on peut calculer le couple du moteur  $C_m$  par l'expression suivante :

$$C_m = \int_S dC_m = \int_S r \cdot dT \quad (4.1)$$

Où  $T$  est l'effort tangent à la surface de l'épaule.

Avec :

$$dT = \mu_d \cdot dN \quad (4.2)$$

Où  $dN$  est l'effort normal sur la facette  $dS$ , et  $\mu_d$  est le coefficient de frottement entre l'acier et l'aluminium.

On a :

$$dN = p \cdot dS \quad (4.3)$$

Avec :

$$p = \frac{F_N}{S} = \frac{F_N}{\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)} \quad (4.4)$$

Où  $p$  et  $F_N$  sont la pression et l'effort axial appliqués par l'outil.

On aboutit à l'équation suivante :

$$C_m = \frac{\mu_d F_N (D^3 - d^3)}{3(D^2 - d^2)} \quad (4.5)$$

- **Application numérique :**

En se référant toujours au travail de la référence [39], l'effort normal maximal  $F$  qu'on a pu atteindre est de l'ordre de 450N. A noter que l'effort normal donnant une meilleure qualité de la soudure est bien inférieur à cette valeur. On va prendre le cas extrême.

- $F_N = 450N$
- $\mu_d = 0,47$
- $D = 16mm$
- $d = 6mm$

Donc :  $C_m = \frac{0,47 \cdot 450 \cdot (16^3 - 6^3)}{3(16^2 - 6^2)} = 1243,4 N \cdot mm = 1,243 N \cdot m$

- **Calcul de la puissance du moteur :**

Pour le soudage de l'aluminium, la fréquence de rotation de l'outil est bornée entre 600 tr/min et 2000 tr/min pour la plupart des alliages [39]. Si on considère le cas extrême, c'est-à-dire de prendre la fréquence de rotation de 2000 tr/min, on aura la puissance mécanique nécessaire à fournir à l'outil.

$$P_m = \omega_{ma} * C_m = \frac{\pi N_{ma} C_m}{30} \quad (4.6)$$

$$P_m = \frac{\pi * 2000 * 1,243}{30} = 260,4 \text{ Watt}$$

Eventuellement, la transformation et la transmission de la puissance présentent des pertes qu'on prend en compte dans le calcul de la puissance électrique du moteur.

$$P_e = \frac{P_m}{\eta_{palier} * \eta_m} \quad (4.7)$$

Avec :

- $\eta_{palier}$  est le rendement mécanique des paliers ( $\geq 0,9$ ).
- $\eta_m$  est le rendement mécanique du moteur, qu'on prend égal à 0,7 étant donné que les moteurs du constructeur *Electro-Industries* ont des rendements supérieurs à ce dernier.

Donc :

$$P_e = \frac{260,4}{0,9 * 0,7} = 413,3 \text{ Watt}$$

Mais, afin de parvenir à toute éventuelle erreur et sous-estimation faite durant le calcul, on multiplie la puissance électrique obtenue par un facteur de sécurité de [40]. Finalement, en se référant au catalogue [Cat1] des produits fournis par le constructeur *Electro-Industries*, on a choisi le moteur avec les caractéristiques suivantes :

Table 4-1 : Caractéristique du moteur asynchrone de puissance 1,1kW. [Cat1]

|                        |                |               |
|------------------------|----------------|---------------|
| Type                   | <b>083-2</b>   | -             |
| Puissance nominale     | <b>1,1</b>     | <b>kW</b>     |
| Vitesse de rotation    | <b>2845</b>    | <b>Tr/min</b> |
| Tension d'alimentation | <b>230/400</b> | <b>V</b>      |
| Fréquence              | <b>50</b>      | <b>Hz</b>     |
| Rendement              | <b>76</b>      | <b>%</b>      |
| Couple nominal         | <b>3,7</b>     | <b>Nm</b>     |
| Forme de construction  | <b>B3</b>      | -             |
| Poids                  | <b>10</b>      | <b>Kg</b>     |
| Diamètre de l'arbre    | <b>19</b>      | <b>mm</b>     |

#### 4.2.2 Calcul du couple des moteurs pas à pas :

Les moteurs pas-à-pas dans cette machine sont responsables des mouvements de translation de la table et de l'outil. La transformation du mouvement de rotation à un mouvement de translation est assurée moyennant les vis à billes. Dans le catalogue de SKF [Cat2], une relation entre l'effort axial et le couple du moteur est présentée comme suit :

$$C_{stp} = \frac{F_a P_h S}{2000 \pi \eta_m} \quad (4.8)$$

Où :

- $C_{stp}$  est le couple du moteur pas-à-pas [Nm].
- $F_a$  est l'effort axial maximal [N].
- $P_h$  est le pas de la vis [mm].

- $s$  est le facteur de sécurité (de 1,25 à 2).
- $\eta_m$  est le rendement mécanique ( $\geq 0,9$ )

L'effort d'avance  $F_s$ , appelé aussi effort de soudage, peut être considéré comme étant la force axiale appliquée par la douille de la vis à billes. Il n'existe pas de formules analytiques ou empiriques comme pour le cas d'usinage pour calculer cet effort. La valeur de ce dernier dépend notamment de la vitesse d'avance [41]. En se référant à [39], la vitesse moyenne d'avance est de 100mm/min, ce qui correspond à une force de soudage de l'ordre de 1kN.

Le pas de la vis à billes est 5mm.

On prend un coefficient de sécurité de valeur 2 [Cat2].

L'application numérique :

$$C_{stp} = \frac{1000 \cdot 5 \cdot 2}{2000\pi \cdot 0,9} = 1,77 N.m$$

On choisit le moteur pas-à-pas Nema 23 ayant les caractéristiques suivantes :

Table 4-2 : Caractéristique du moteur Nema 23 de couple de 1,8Nm.

|                     |                     |                            |
|---------------------|---------------------|----------------------------|
| Modèle              | <b>57HS7630B4D8</b> | -                          |
| Phases              | <b>2</b>            | -                          |
| Angle d'étape       | <b>1,8</b>          | °                          |
| Tension             | <b>3,08</b>         | <b>V</b>                   |
| Courant             | <b>3</b>            | <b>A</b>                   |
| Résistance          | <b>1,1</b>          | <b><math>\Omega</math></b> |
| Inductance          | <b>3,6</b>          | <b>mH</b>                  |
| Couple              | <b>1,89</b>         | <b>Nm</b>                  |
| Diamètre de l'arbre | <b>8</b>            | <b>mm</b>                  |
| Poids               | <b>1,2</b>          | <b>kg</b>                  |

### 4.3 Vérification de la résistance des éléments de la machine aux efforts appliqués :

Que ce soit au repos ou en marche, les éléments de la machine subissent des chargements mécaniques qui engendrent des contraintes et des déformations. Pour ne pas endommager la machine, il est nécessaire de vérifier que la contrainte maximale atteinte ne dépasse pas la limite pratique d'élasticité. Pour un bon fonctionnement de la machine, on doit vérifier que les déformations et les déplacements ne sont pas excessifs.

Les organes les plus sollicités sont :

- Les tiges des glissières.
- Les clavettes.
- L'arbre porte-outil.
- L'outil et le pion.
- Les vis de fixation.

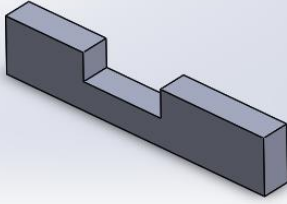
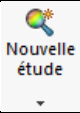

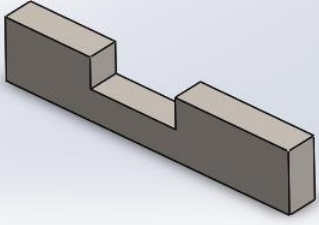
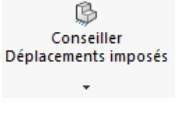
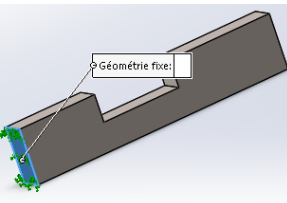
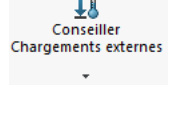
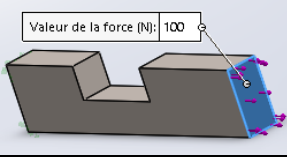
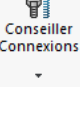
Les types de sollicitations appliquées ne sont pas purs, mais ils sont plutôt des combinaisons des différents types : flexion, torsion, cisaillement, etc. Les calculs de la


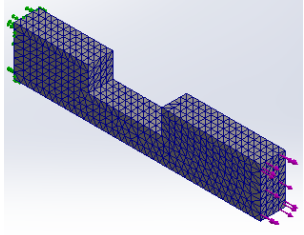


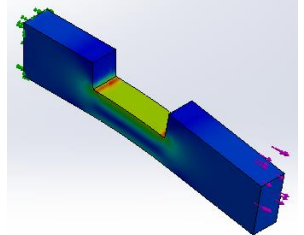
résistance des matériaux qui servent à quantifier les contraintes et les déformations deviennent plus compliqués. C'est pour cette raison qu'on a utilisé un calculateur numérique. Comme notre conception est faite sur SOLIDWORKS, on emploie directement le module intégré 'Simulation'.

#### 4.3.1 Simulation à l'aide du logiciel SOLIDWORKS :

Le module 'Simulation' de SOLIDWORKS permet à l'utilisateur de simuler différents phénomènes : la déformation des solides, l'écoulement des fluides, le transfert de chaleur, etc. Le tableau suivant montre les étapes nécessaires à suivre pour faire une étude :

Table 4-3: Liste des étapes de la simulation.

| Etape   | Icône   | Description   | Visualisation   |
|---|---|---|---|
| Préparer le modèle géométrique.                       | -   | Concevoir la/les pièce(s).  |                          |
| Commencer une nouvelle étude.                         |   | Dans le cas de ce projet, on va faire une étude statique.   | -   |
| Définir le matériau de chacune des pièces.            |  | Le logiciel SOLIDWORKS possède une large gamme de matériaux prédéfinis dans une bibliothèque.   | Ex : Acier allié.<br>  |
| Définir les déplacements imposés.                     |  | Il s'agit des conditions aux limites sur les déplacements.  | Ex : Encastrement.<br> |
| Définir les charges externes.                         |  | Il s'agit des conditions aux limites sur le chargement.   | Ex : Force.<br>        |
| Définir les connexions (S'il s'agit d'un assemblage). |  | Par défaut, les pièces en contact direct sont considérées complètement solidaires. Dans le cas contraire, il faut définir le type de contact. | -   |

| Etape                     | Icône   | Description  | Visualisation  |
|---------------------------|---|--|--|
| Générer le maillage.      |  | On fait rentrer la densité du maillage et SOLIDWORKS le génère automatiquement.                                |                       |
| Lancer l'étude.           |  | Selon la densité du maillage, le temps de calcul et les ressources informatiques consommées varient largement. | -  |
| Visualiser les résultats. |  | Il est possible de voir la/les pièce(s) déformée(s), les contraintes, les déformations et les déplacements.    | Ex : Contraintes.<br> |

### Remarques :

- Dans le cas d'assemblage, on peut exclure des pièces de l'étude.
- Si un matériau n'est pas défini dans la bibliothèque, on peut ajouter un nouveau matériau connaissant ses propriétés.
- Il est possible de localiser les valeurs maximales.

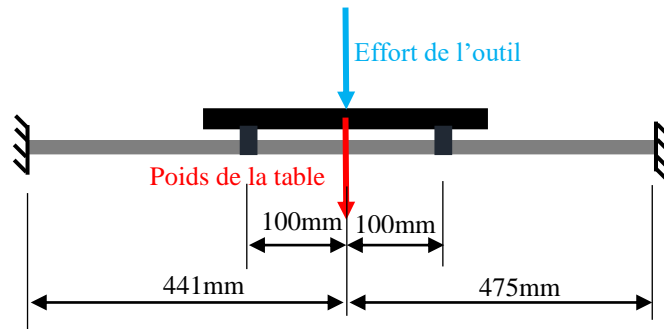
## 4.4 Dimensionnement des tiges des glissières :

### 4.4.1 Dimensionnement des tiges des glissières suivant l'axe X :

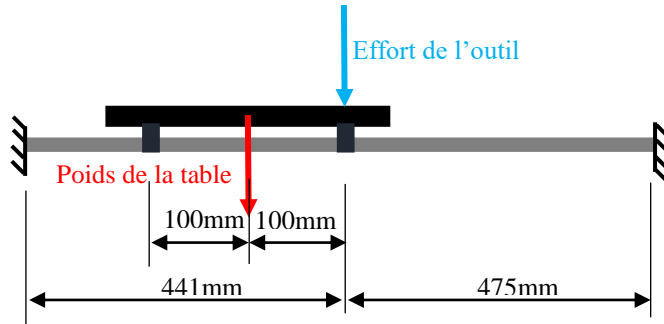
Ces tiges sont celles qui supportent la table de travail. Durant l'opération de soudage, les tiges devraient supporter le poids de la table ainsi que l'effort normal appliqué par l'outil.

La table est supportée sur quatre (04) points. Ainsi, au niveau de chaque articulation, on applique une force équivalente à un quart du poids de la table.

Le point d'application de l'effort par l'outil varie en fonction de la position de ce dernier par rapport à la table. On étudie le cas où l'outil est directement au-dessus de l'une des tiges. On peut distinguer deux configurations.



Configuration 1 : Table au milieu.



Configuration 2 : Effort axial appliqué sur l'un des roulements linéaires

Figure 4-2 : les configurations de la tige X.

La première configuration représente l'outil appliquant une force au milieu de la table. Donc, la force appliquée sur chaque articulation est la moitié de la force normale. Dans la deuxième configuration, l'outil s'appuie directement sur l'une des articulations.

- **Les paramètres nécessaires pour réaliser la simulation :**
  - La table est en alliage d'aluminium et sa masse est ~10kg.
  - La masse d'un seul roulement à billes est 0,3kg.
  - La matière des tiges est de l'acier inoxydable (limite d'élasticité de 241,3 MPa).
  - La force appliquée par l'outil est de l'ordre de 450N.
  - Diamètre des tiges est 25mm.
- **Résultats de la simulation :**

Après l'exécution de l'étude, on a eu les résultats suivants :

Table 4-4 : Résultats de la simulation pour la tige X.

| Configuration | Contrainte maximale (MPa) | Déplacement maximal (mm) |
|---------------|---------------------------|--------------------------|
| 1             | 42,61                     | 5,047e-01                |
| 2             | 45,59                     | 5,380e-01                |



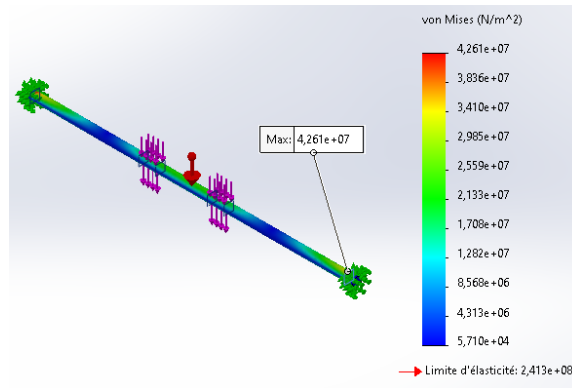


Figure 4-3 : Visualisation de la distribution des contraintes pour la tige de l'axe X  
(Configuration 1).

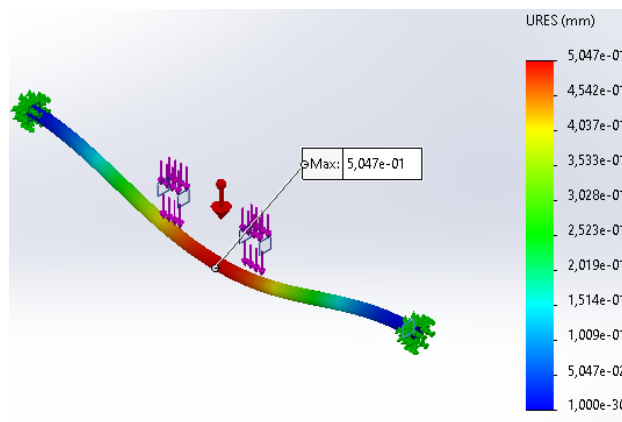


Figure 4-4: Visualisation de la déformée (échelle exagérée) pour la tige de l'axe X  
(Configuration 1).

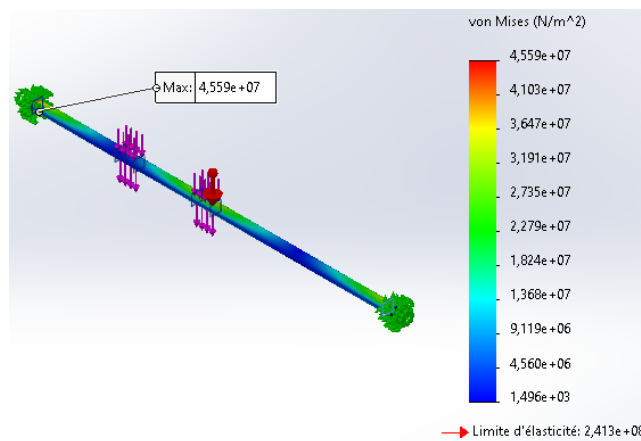


Figure 4-5: Visualisation de la distribution des contraintes pour la tige de l'axe X  
(Configuration 2).

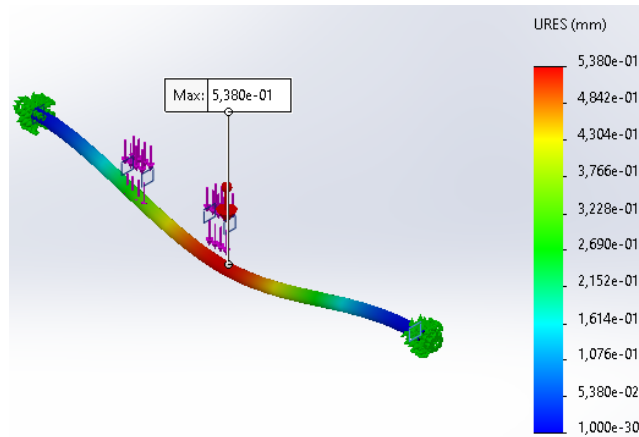


Figure 4-6 : Visualisation de la déformée (échelle exagérée) pour la tige de l'axe X, (Configuration 2).

On peut observer que la configuration la plus sollicitée est la deuxième configuration. Cependant, les valeurs trouvées sont proches, étant donné que l'effort principal est celui appliqué par l'outil.

Les parties les plus sollicitées de la tige sont les extrémités et entre les deux roulements linéaires.

La tige de la glissière suivant l'axe X, ayant un diamètre de 25mm, peut supporter les charges externes durant le soudage. Les contraintes appliquées, selon le critère de Von-Mises, sont bien inférieures à la limite d'élasticité de l'acier inoxydable. Il est possible de choisir un diamètre plus faible. Mais, étant donné que ces tiges ont un diamètre normalisé, le seul choix serait 20mm. Un tel choix peut engendrer des déformations excessives non souhaitées dans cette machine.

#### 4.4.2 Dimensionnement des tiges des glissières suivant l'axe Y :

On suit la même démarche que précédemment. Les tiges devraient supporter le poids des éléments, l'effort normal et l'effort de soudage appliqué sur l'outil.

En raison de symétrie on peut faire le calcul des réactions sur un seul palier glissant pour chaque tige, ceci lorsqu'on divise par deux toutes les forces extérieures.

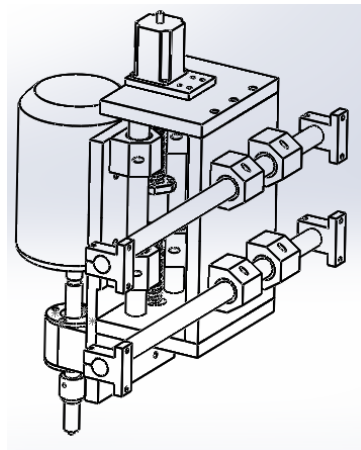


Figure 4-7 : Vue isométrique des éléments supportés par les tiges suivant l'axe Y.

La masse de tous les éléments est estimée à 30kg y compris la masse des moteurs et des accessoires. Dans le détail, les plaques sont en alliage d'aluminium de masse 10,33kg. Le moteur asynchrone est de masse 10kg. Le moteur pas à pas et les autres accessoires ont une masse estimée à un peu moins de 10kg. Le poids serait donc  $P = 294,3N$  s'appliquant au milieu entre l'axe de l'outil et l'axe de la tige.

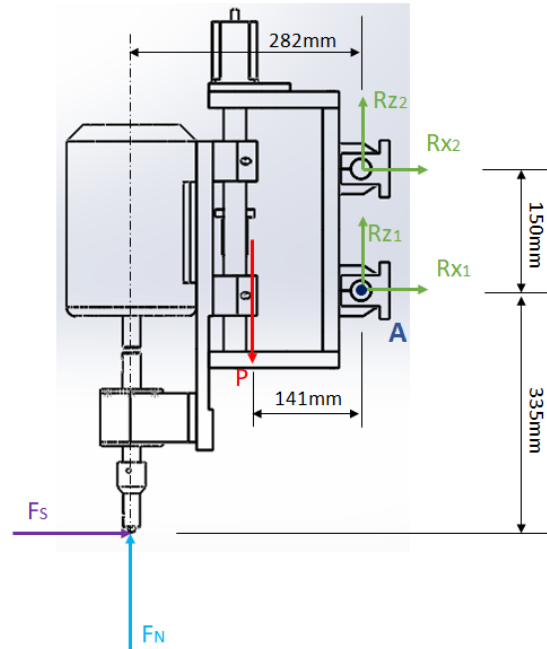


Figure 4-8 : Schéma décrivant la disposition des forces et des réactions.

Avec :

- $F_s$  est l'effort de soudage.
- $F_N$  est l'effort normal.
- $P$  est le poids de l'ensemble.
- $R_{x1}$ ,  $R_{z1}$ ,  $R_{x2}$  et  $R_{z2}$  sont les réactions au niveau des roulements linéaires.

• **Calcul des réactions :**

Pour trouver les réactions au niveau des paliers glissants, on applique la loi fondamentale de la statique, telle qu'énoncée :

*« La somme des forces extérieures (et moments extérieurs), appliquées à un système en équilibre dans un référentiel galiléen, est nulle. »*—Principe fondamental de la dynamique.

La somme des forces suivant l'axe X :

$$\sum F_{/x} = \frac{F_s}{2} + R_{x1} + R_{x2} = 0 \quad (4.9)$$

La somme des forces suivant l'axe Z :

$$\sum F_{/y} = \frac{F_N}{2} + R_{z1} + R_{z2} - \frac{P}{2} = 0 \quad (4.10)$$

La somme des moments par rapport au point A :

$$\sum M_{/A} = 335 * \frac{F_s}{2} - 282 * \frac{F_N}{2} + 141 * \frac{P}{2} - 150 * R_{x_2} = 0 \quad (4.11)$$

Avec :

- $P = 294,3 \text{ N}$
- $F_N = 450 \text{ N}$
- $F_s = 1000 \text{ N}$

Le système est hyperstatique, c'est-à-dire qu'il a plus de liaisons qu'il peut avoir pour éliminer tous les degrés de libertés. Sans se concentrer sur les calculs mathématiques, on peut observer le cas réel où il pourrait y avoir un jeu qui provient de l'étape de fabrication ou celle de l'assemblage. Dans ce cas particulier, seule une tige supporte l'effort vertical. Donc, l'équation de la résultante des forces verticales sera :

$$\sum F_{/y} = \frac{F_N}{2} + R_z - \frac{P}{2} = 0 \quad (4.12)$$

Après la résolution du système d'équations, on aboutit aux résultats suivants :

$$R_{x_1} = -1331,99 \text{ N}$$

$$R_{x_2} = 831,99 \text{ N}$$

$$R_z = -77,85 \text{ N}$$

On remarque que la tige 1 est la plus sollicitée.

On injecte ces valeurs dans le modèle pour réaliser la simulation. Bien sûr, on étudie aussi les deux configurations extrêmes.

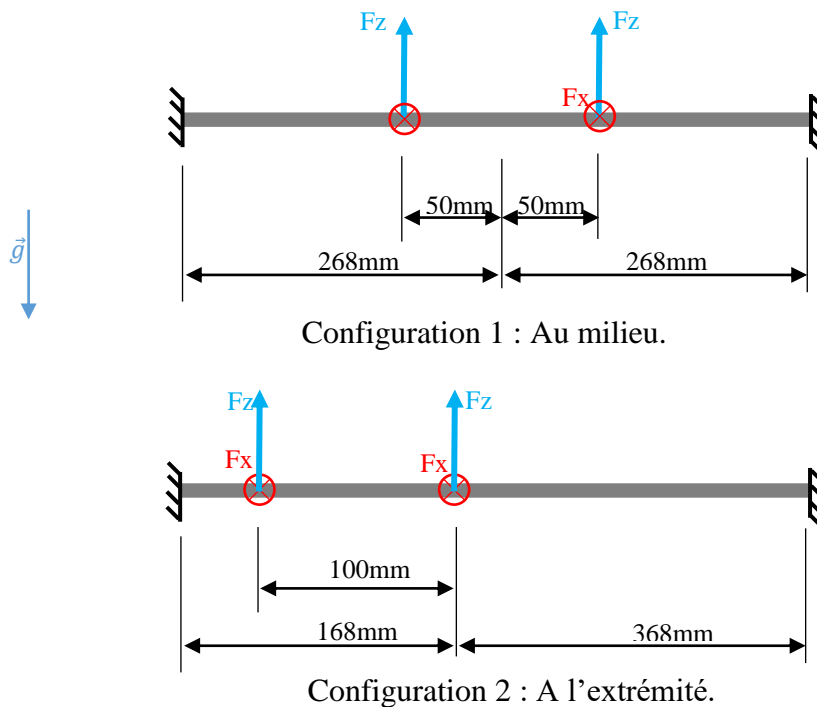


Figure 4-9 : les configurations de la tige Y.

- **Résultats de la simulation :**

Table 4-5 : Résultats de la simulation pour la tige Y.

| Configuration | Contrainte maximale (MPa) | Déplacement maximal (mm) |
|---------------|---------------------------|--------------------------|
| 1             | 129,0                     | 4,074e-01                |
| 2             | 128,2                     | 2,342e-01                |

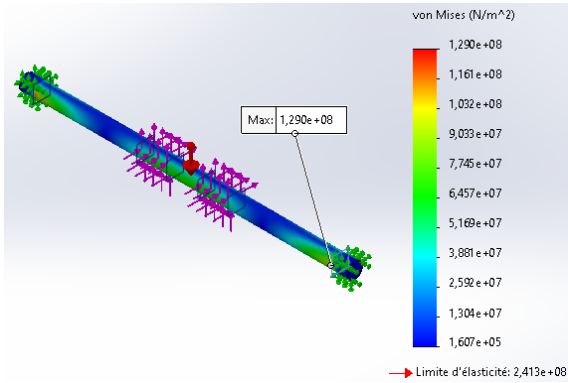


Figure 4-10 : Visualisation de la distribution des contraintes pour la tige de l'axe Y (Configuration 1).

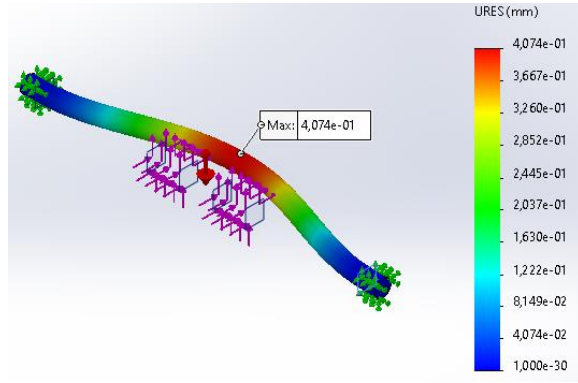


Figure 4-11 : Visualisation de la déformée (échelle exagérée) pour la tige de l'axe Y, (Configuration 1).

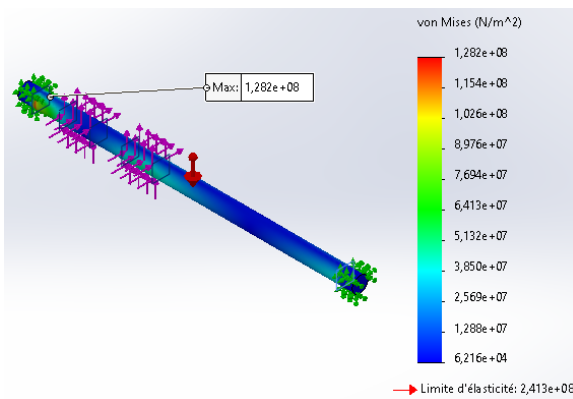


Figure 4-12 : Visualisation de la distribution des contraintes pour la tige de l'axe X (Configuration 2).

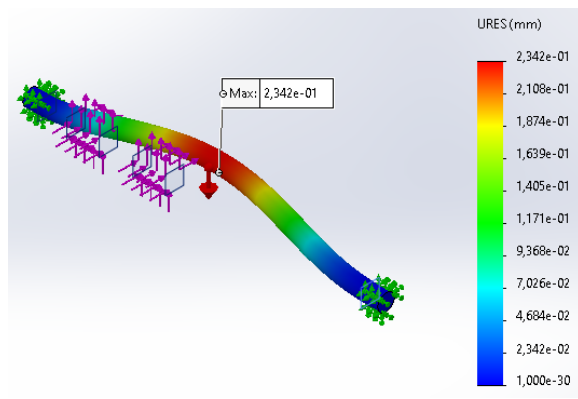


Figure 4-13 : Visualisation de la déformée (échelle exagérée) pour la tige de l'axe X, (Configuration 2).

#### 4.4.3 Dimensionnement des tiges des glissières suivant l'axe Z :

On suit la même démarche, en calculant les réactions au niveau des paliers glissants, puis en effectuant la simulation.

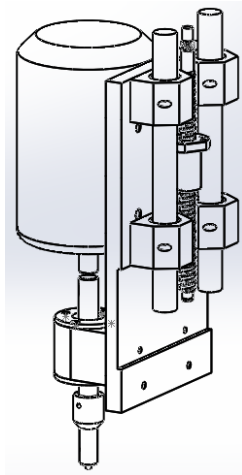


Figure 4-14 : Vue isométrique des éléments supportés par les tiges suivant l'axe Z.

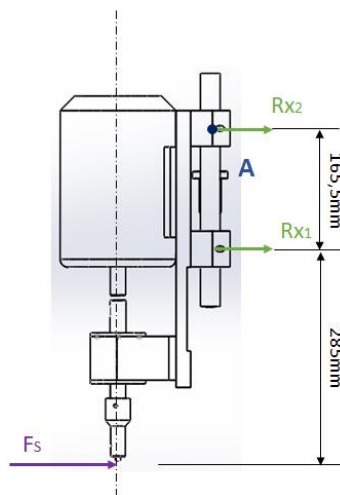


Figure 4-15 : Schéma décrivant la disposition des forces et des réactions.

- **Calcul des réactions :**

On applique les lois de la statique :

La somme des forces suivant l'axe X :

$$\sum F_{/x} = \frac{F_s}{2} + R_{x_1} + R_{x_2} = 0 \quad (4.13)$$

La somme des moments par rapport à A :

$$\sum M_{/A} = 450,5 * \frac{F_s}{2} + 150 * R_{x_1} = 0 \quad (4.14)$$

Avec :

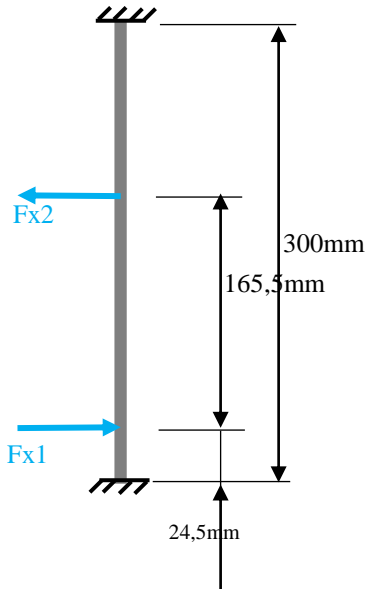
- $F_s = 1000N$

Après le calcul, on aboutit aux résultats suivants :

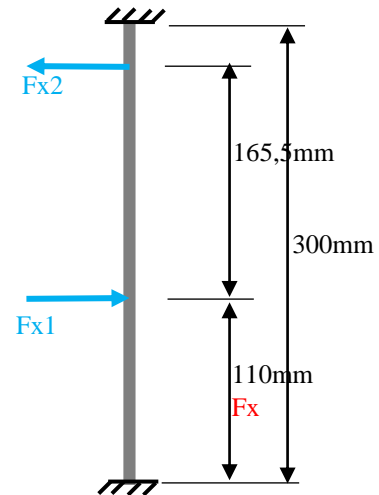
$$R_{x_1} = -1500,7 \text{ N}$$

$$R_{x_2} = 1001,7 \text{ N}$$

On injecte les valeurs dans le modèle tout en prenant en considération les deux configurations suivantes :



Configuration 1 : En bas.



Configuration 2 : En haut.

Figure 4-16 : les configurations de la tige Z.

- **Résultats de la simulation :**

Table 4-6 : Résultats de la simulation pour la tige Z.

| Configuration | Contrainte maximale (MPa) | Déplacement maximal (mm) |
|---------------|---------------------------|--------------------------|
| <b>1</b>      | 129,0                     | 4,074e-01                |
| <b>2</b>      | 128,2                     | 2,342e-01                |

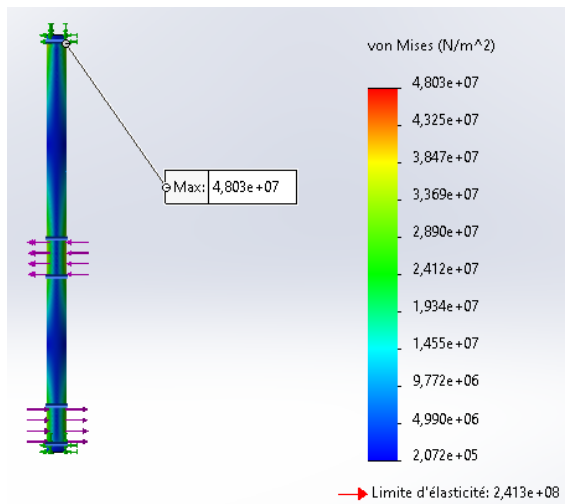


Figure 4-17 : Visualisation de la distribution des contraintes pour la tige de l'axe Z (Configuration 1).

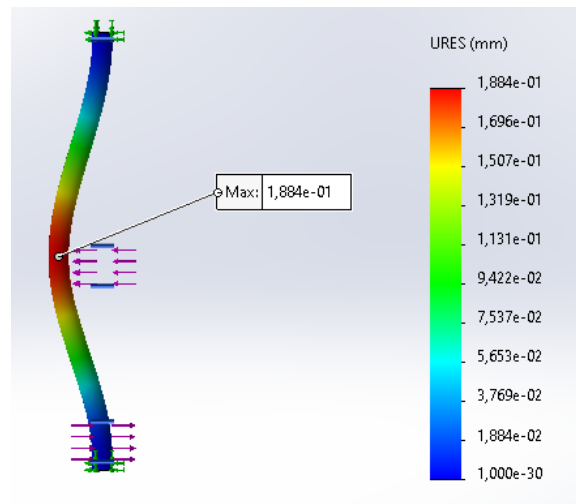


Figure 4-18 : Visualisation de la déformée (échelle exagérée) pour la tige de l'axe Z, (Configuration 1).

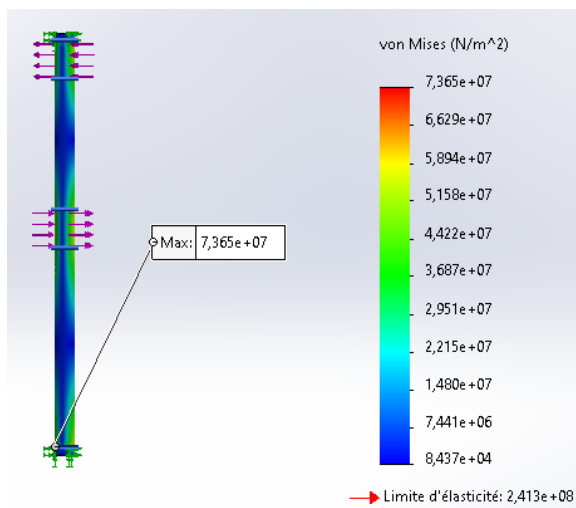


Figure 4-19 : Visualisation de la distribution des contraintes pour la tige de l'axe X (Configuration 2).

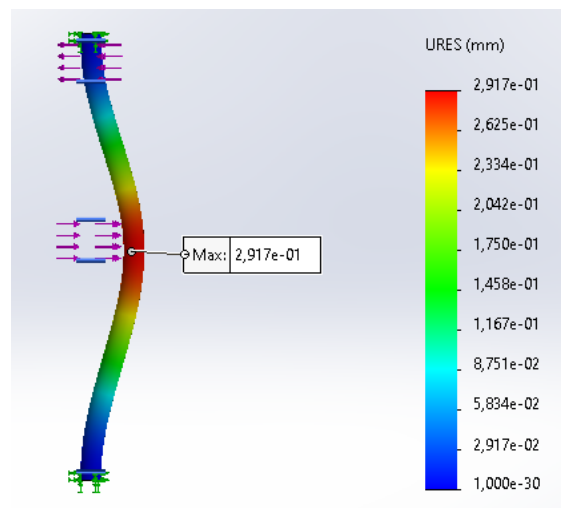


Figure 4-20: Visualisation de la déformée (échelle exagérée) pour la tige de l'axe X, (Configuration 2).

- **Remarques :**

A travers ces simulations, on observe bien que les tiges de guidage résistent aux sollicitations qui s'y appliquent et avec un coefficient de sécurité élevé. Mais, on a exigé aussi une condition sur les déplacements ; il faut qu'ils ne soient pas excessifs. On peut vérifier ceci, étant donné que dans tous les cas précédents, les déplacements maximaux ne dépassent pas 0,6mm. Cela donne plus de rigidité à la structure de la machine.



## 4.5 Vérification de la résistance au chargement pour l'outil et porte-outil :

Dans ce cas, les éléments subissent des efforts de compression, de flexion et de torsion selon le schéma suivant :

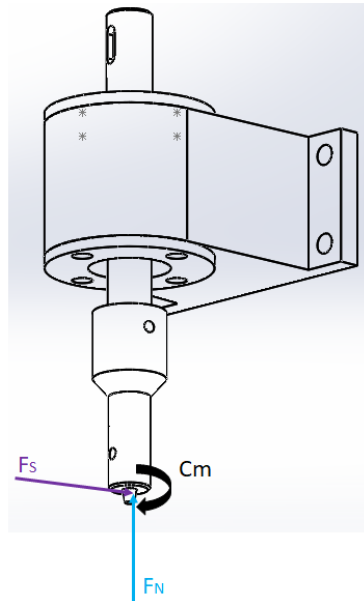


Figure 4-21 : Schéma des forces appliquées sur l'outil et le porte-outil.

Les matériaux de chaque élément peuvent être résumés comme suit :

- Brides, logement et arbre : Acier non allié C45. ( $Re = 221MPa$ )
- Epaulement et pion : Acier outil X39CrMoV5. ( $Re = 1910MPa$ )

En réalisant la simulation, on trouve les résultats suivants :

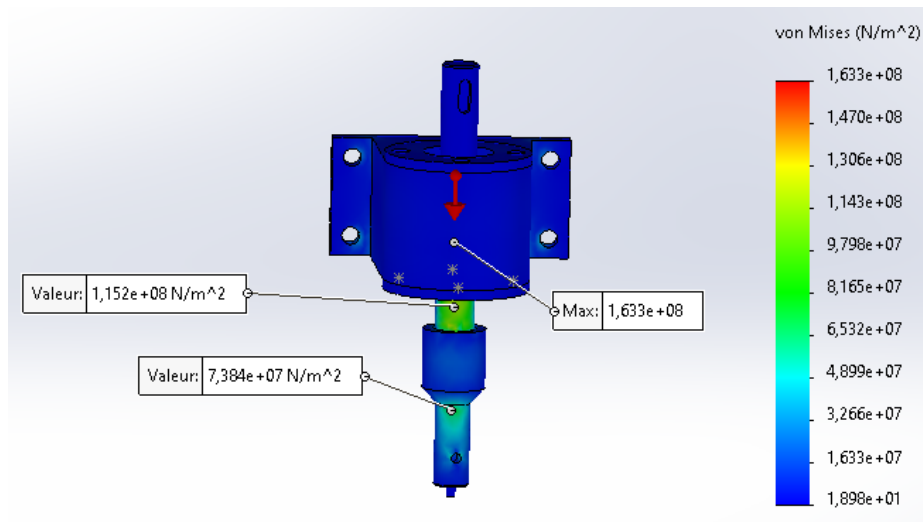


Figure 4-22 : Visualisation de la distribution des contraintes sur l'outil et le porte-outil.

L'élément le plus sollicité est l'arbre. On remarque que les contraintes appliquées n'atteignent pas la limite élastique selon le critère de Von-Mises.

## 4.6 Calculs des clavettes :

Les clavettes à employer dans la machine devraient vérifier deux critères, la résistance au cisaillement et la résistance à la pression de matage.

Dans notre cas, on utilise des clavettes parallèles de forme A.

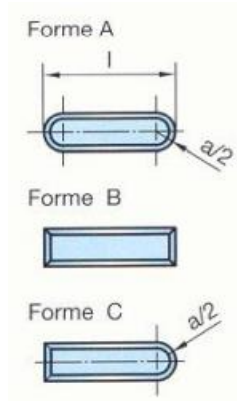


Figure 4-23 : Différentes formes de clavettes parallèles. [Cat3]

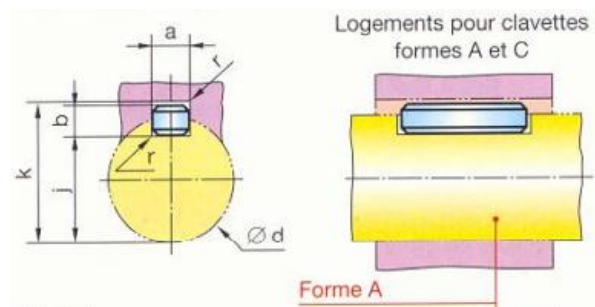


Figure 4-24 : Clavette montée. [Cat3]

Pour un arbre de 19mm, et en se référant à « Chevalier » le Guide du Dessinateur Industriel [Cat3], les dimensions normalisées des clavettes, selon la norme NF E 22-177, sont :

Table 4-7 : Dimensions de la clavette.

| <b>d</b> | <b>a</b> | <b>b</b> | <b>j</b> | <b>k</b> | <b>Unité</b> |
|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| 19       | 6        | 6        | 15,5     | 21,8     | mm           |

### 4.6.1 Critère de cisaillement :

Le critère du cisaillement est donné par :

$$\tau_{cis} < \frac{Rg}{s} \quad (4.15)$$

Avec :

$$- \tau_{cis} \text{ est la contrainte de cisaillement donnée par : } \tau_{cis} = \frac{C_m}{\frac{d}{2} \cdot a \cdot l} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} & - C_m \text{ est le couple moteur [Nm].} \\ & - Rg \text{ est la résistance au glissement [MPa]. } Rg = 0,7Re \quad (4.17) \\ & - Re \text{ est la limite élastique [MPa]. } Re = 565MPa \text{ pour l'acier C45E.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - s \text{ est le facteur de sécurité. (généralement vaut 3).} \\ & - Rpg \text{ est la résistance pratique au glissement [MPa]. } Rpg = \frac{Rg}{s} \quad (4.18) \end{aligned}$$

Pour vérifier le critère de cisaillement, la longueur  $l$  est donnée par :

$$l > \frac{C_m}{\frac{d}{2} \cdot a \cdot Rpg} \quad (4.19)$$

- **Application numérique :**

On a :

- $C_m = 59,2 N.m = 59200 N.mm$  (Le couple maximal transmissible par le moteur).
- $Rpg = \frac{0,7 \cdot 565}{3} \approx 132 MPa$ .

Ainsi :  $l > \frac{59200}{\frac{19}{2} \cdot 6 \cdot 132}$

Donc :  $l > 7,868 mm$

La longueur normalisée qui est supérieure ou égale à la longueur calculée est  $l = 10 mm$ .

#### 4.6.2 Critère de pression de matage :

Le matage est une déformation plastique localisée de la matière causée par un choc ou par une pression élevée.

Pour que la clavette résiste à la pression de matage, elle devrait vérifier le critère suivant :

$$p_m = \frac{C_m}{\frac{d}{2}(d-j)l} < p_a \quad (4.20)$$

Avec :

- $p_m$  est la pression de matage [MPa].
- $p_a$  est la pression de matage admissible.

Selon la référence [42], la pression de matage admissible dépend du type du montage de la clavette dans la rainure et les conditions de fonctionnement. Le tableau suivant illustre les plages de valeurs admissibles :

Table 4-8 : Pressions de matage admissibles en fonction du type de montage et des conditions de fonctionnement.

| Montage  | Conditions de fonctionnement |                     |             |
|----------|------------------------------|---------------------|-------------|
|          | Excellentes                  | Normales            | Mauvaises   |
| Glissant | 10 à 20 MPa                  | 5 à 15 MPa          | 2 à 10 MPa  |
| Normal   | 30 à 50 MPa                  | 20 à 40 MPa         | 15 à 30 MPa |
| Serré    | 80 à 150 MPa                 | <b>60 à 100 MPa</b> | 40 à 70 MPa |

Dans le cas de cette conception, on se met dans des conditions de fonctionnement normales pour un montage serré de clavette.

- **Application numérique :**

On a :

$$p_m = \frac{59200}{\frac{19}{2} * (19 - 15,5) * 10}$$

Donc :  $p_m = 178,05 \text{ MPa}$

On remarque que même si le critère de cisaillement est vérifié, celui de la pression de matage n'est pas vérifié.

On fait augmenter la longueur jusqu'à obtenir une pression de matage comprise dans l'intervalle admissible.

On atteint une longueur  $l = 20\text{mm}$  avec une pression de matage  $p_m = 89,02 \text{ MPa}$ .

Finalement, on choisit une clavette avec la désignation :

**Clavette parallèle, forme A, 6 × 6 × 20 , NF E 22 – 177.**

#### 4.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a pu faire des calculs analytiques et des simulations numériques qui justifient les choix pris durant cette conception.

## **5 Chapitre 5 : Gammes d'usinage et gamme d'assemblage.**

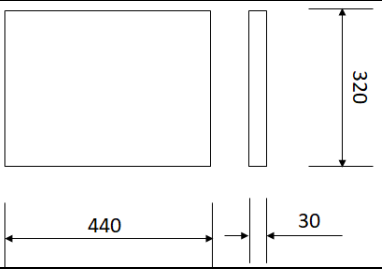
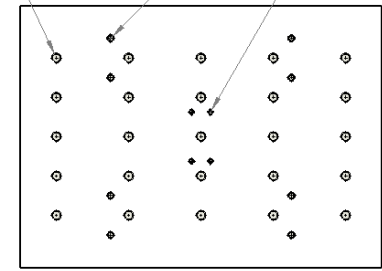
## 5. Chapitre 5 : Gammes d'usinage et gamme d'assemblage.

### 5.1 Introduction :

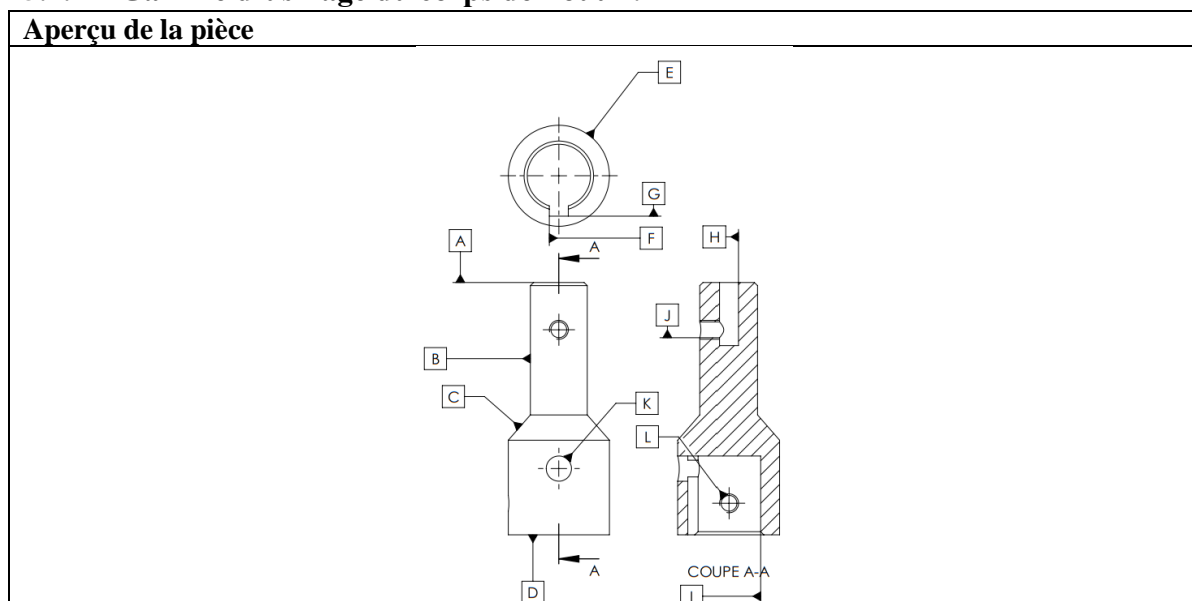
Dans ce chapitre, on va présenter la gamme d'usinage de quelques pièces de la machine et son ordre de montage.

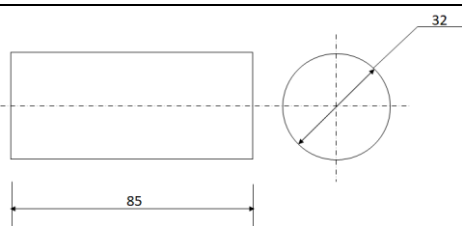
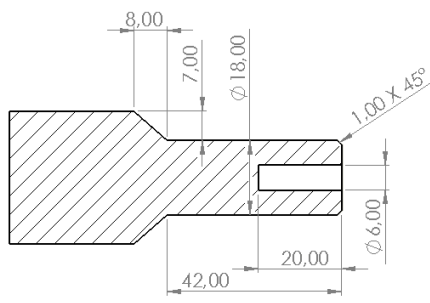
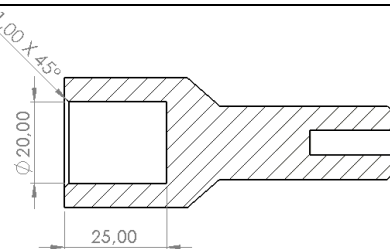
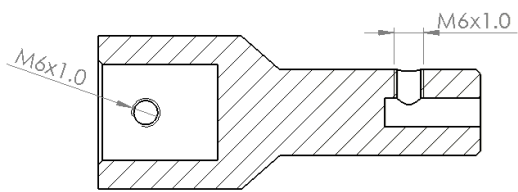
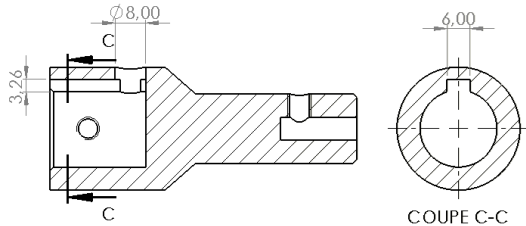
### 5.2 Gammes d'usinage :

#### 5.2.1 Gamme d'usinage de la table de travail :

| Phase | Sous-phase | Machine    | Opérations   | Croquis  |
|-------|------------|------------|--|--|
| 000   |            | Oxycoupage | Découpage de brut.   |   |
| 100   |            | Fraisage   | Perçage débouchant<br>Taraudage M12.<br>Perçage borgne.<br>Taraudage M8.<br>Perçage borgne.<br>Taraudage M6. |  |

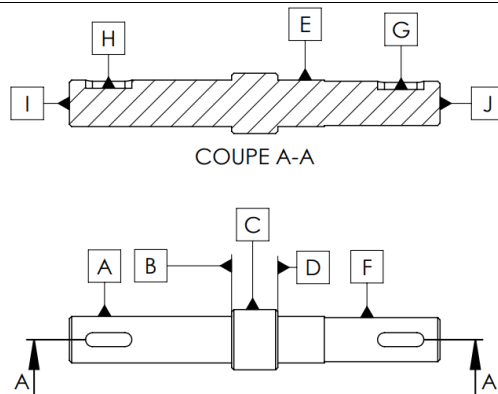
#### 5.2.2 Gamme d'usinage du corps de l'outil :

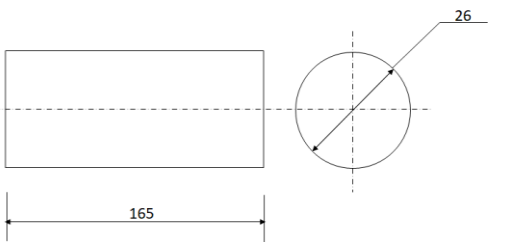
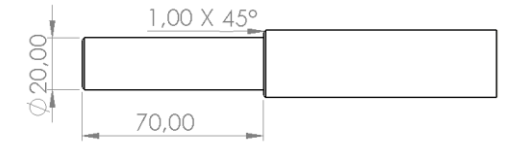
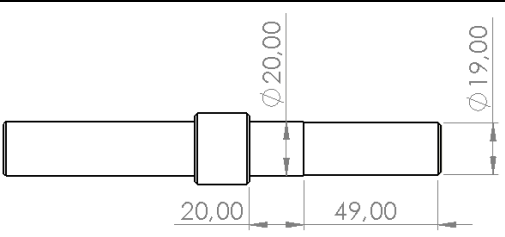
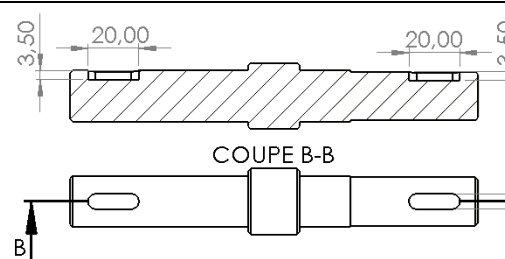


| Phase | Machine   | Sous-phase | Opérations  | Croquis  |
|-------|-----------|------------|---|--|
| 000   | Scie      |            | Sciage de brut  |    |
| 100   | Tour      | 110        | Dressage A.<br>Chariotage B, C.<br>Chanfrein.<br>Perçage H. |    |
|       |           | 120        | Dressage D.<br>Perçage D.<br>Chanfrein.                     |   |
| 200   | Fraiseuse | 210        | Perçage J.<br>Taraudage M6.                                 |  |
|       |           | 220        | Perçage J.<br>Taraudage M6.                                 |  |
|       |           | 230        | Perçage K.<br>Rainure de clavette<br>F, G.                  |  |

### 5.2.3 Gamme d'usinage arbre-porte-outil :

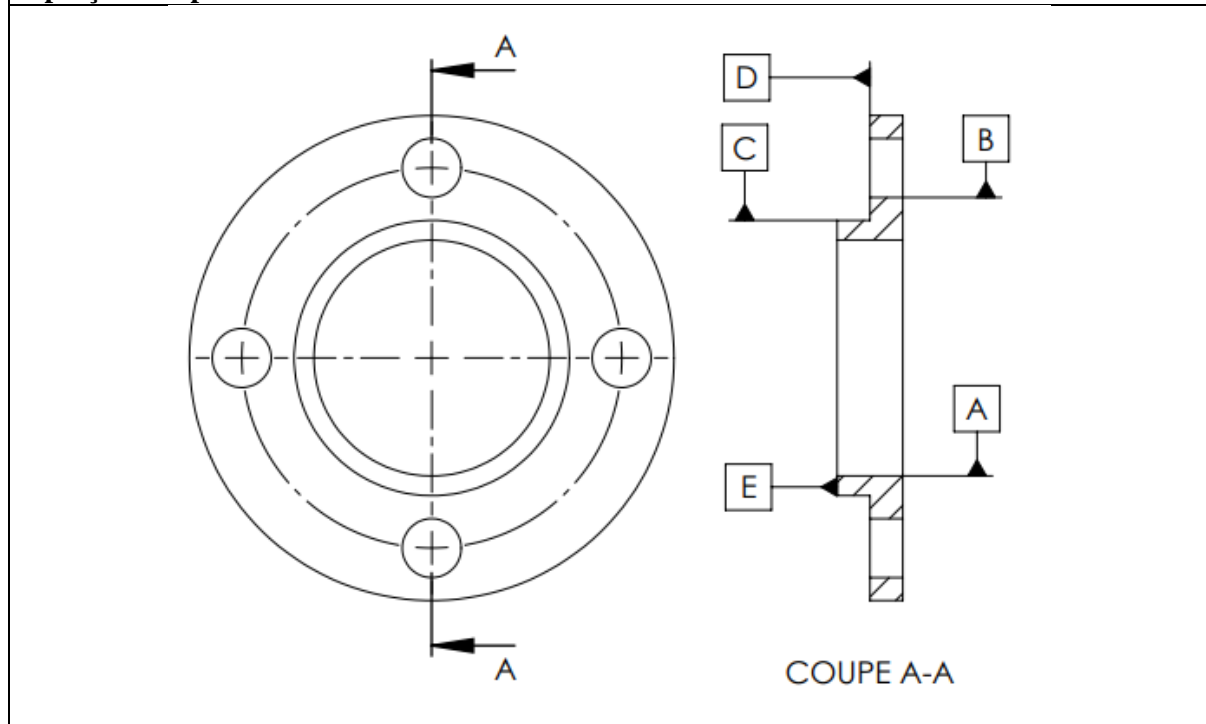
#### Aperçu de la pièce



| Phase | Machine   | Sous-phase | Opérations                                      | Croquis   |
|-------|-----------|------------|---|---|
| 000   | Scie      |            | Sciage de brut                                  |   |
| 100   | Tour      | 110        | Dressage I.<br>Chariotage A, B.<br>Chanfrein.   |   |
|       |           | 120        | Dressage J.<br>Chariotage D, E, F<br>Chanfrein. |   |
| 200   | Fraiseuse | 210        | Rainure de clavette<br>H.                       |  |
|       |           | 220        | Rainure de clavette<br>G.                       |   |

### 5.2.4 Gamme d'usinage de la bride :

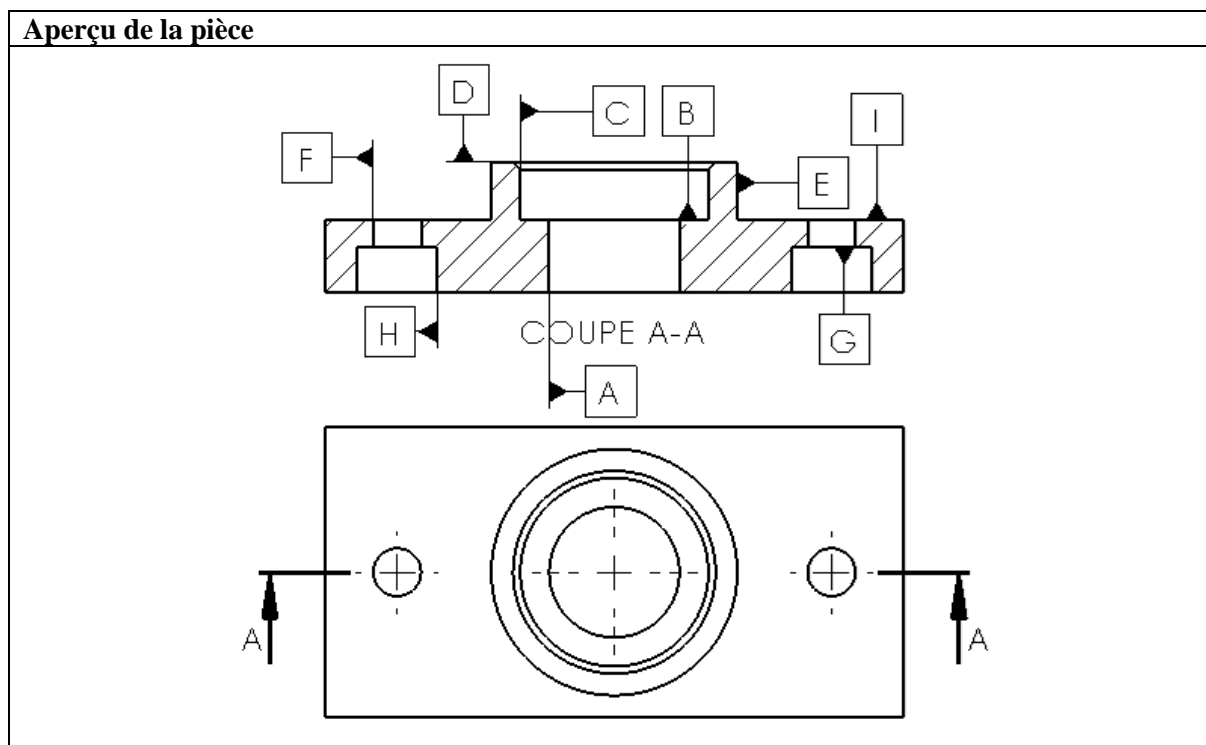
#### Aperçu de la pièce





| Phase | Machine   | Sous-phase | Opérations  | Croquis |
|-------|-----------|------------|---|---------|
| 000   |           |            | Préparation de brut.                                |         |
| 100   | Tour      | 110        | Perçage, alésage A.<br>Chariotage, dressage C, D, E |         |
| 200   | Fraiseuse | 210        | Perçage B.  |         |

### 5.2.5 Gamme d'usinage du palier moteur Y :



| Phase | Machine          | Sous-phase | Opérations   | Croquis |
|-------|------------------|------------|--|---------|
| 000   | Scie             |            | Sciage de brut.  |         |
| 100   | Centre d'usinage | 110        | Perçage, alésage A.<br>Alésage B, C.<br>Chanfrein.<br>Surfaçage D, E, I.<br>Perçage F. |         |
| 200   | Fraiseuse        | 210        | Perçage G, H.  |         |

### 5.2.6 Gamme d'usinage bride moteur X :

| Aperçu de la pièce |         |            |                 |         |
|--------------------|---------|------------|-----------------|---------|
|                    |         |            |                 |         |
| Phase              | Machine | Sous-phase | Opérations      | Croquis |
| 000                | Scie    |            | Sciage de brut. |         |

|     |                   |     |  |  |
|-----|-------------------|-----|--|--|
| 100 | Centre d'usinage. | 110 | Surfaçage A, B, C, D.<br>Perçage, alésage E. |  |
| 200 | Fraiseuse         | 210 | Perçage H.                                   |  |
|     |                   | 220 | Perçage, taraudage F<br>Perçage G.           |  |

### 5.3 Gamme d'assemblage :

L'assemblage des différentes pièces de la machine doit suivre un ordre logique :

- Préparer les cadres du châssis, la traverse et les goussets :
  - Assembler les cadres verticaux sur le cadre bas, puis monter la traverse.
- Préparer les pièces de l'axe X :
  - Monter les supports d'axe, le palier roulement et la bride du moteur sur le châssis.
  - Monter les paliers roulements linéaires sur les tiges de guidage.
  - Monter la douille de la vis à billes dans son logement.
  - Monter le roulement à billes dans l'extrémité de la vis à billes.
  - Positionner les tiges de guidage dans les porte-axes et serrer les vis de fixation.
  - Positionner la vis à billes dans les paliers.
  - Monter le moteur pas à pas de façon que l'arbre moteur soit connecté à la vis à billes par l'intermédiaire de l'accouplement flexible.
  - Monter la table de travail sur les paliers glissants.
- Préparer les pièces de l'axe Y :
  - Monter la plaque gauche sur le châssis.

- Monter les paliers roulements linéaires sur les tiges de guidage.
- Monter la douille de la vis à billes dans son logement.
- Monter le roulement à billes dans l'extrémité de la vis à billes.
- Placer les tiges de guidage dans les trous de la plaque gauche.
- Monter la plaque droite sur le châssis.
- Monter le palier roulement sur la plaque droite.
- Placer la vis à billes dans le palier.
- Monter le moteur pas à pas de façon que l'arbre moteur sera connecté à la vis à billes par l'intermédiaire de l'accouplement flexible.
- Monter la plaque arrière sur les paliers glissants.
- Préparer les pièces de l'axe Z :
  - Refaire les mêmes étapes que le montage de l'axe Y.
  - Monter la plaque avant dans les paliers glissants de l'axe Z.
- Préparer les pièces du palier-porte-outil :
  - Sur l'arbre-porte-outil, monter les bagues des roulements à rouleaux coniques.
  - Placer l'ensemble d'arbre-roulements dans le logement du palier.
  - Fixer des deux côtés les brides.
  - Le montage est en X.
- Préparer les pièces de l'axe de rotation :
  - Monter le moteur asynchrone sur la plaque avant.
  - Monter la clavette et l'accouplement rigide sur l'arbre moteur.
  - Monter les clavettes sur l'arbre-porte-outil.
  - Monter le palier-porte-outil.
  - Monter le corps de l'outil sur l'arbre porte-outil et le fixer par une vis de pression.
  - Fixer le pion dans le corps de l'outil par une vis de pression.

## 5.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a montré brièvement les différentes étapes d'usinage, les machines et les opérations à réaliser qui transforment la matière brute en une pièce finie. Les plans de définition de toutes les pièces à usiner sont présentés dans l'annexe.

# Conclusion générale

Notre objectif était de doter notre département d'un prototype de machine de soudage par FSW à 3 axes.

Pour cela, nous avons fait l'étude et la conception d'un modèle de laboratoire

Nous avons présenté dans un premier temps le procédé de soudage par friction malaxage FSW, et on s'est positionné par rapport à l'état de l'art des machines existantes.

Par la suite, Nous avons défini l'objectif en répondant à un cahier des charges et à l'ensemble des buts à achever tout en proposant des solutions pour chacun.

Nous avons ensuite conçu et dimensionné les éléments constituant la machine. Et Nous avons réalisé les dessins de définition de toutes les pièces à réaliser, la gamme d'usinage et la gamme d'assemblage.

Durant ce travail, nous avons rencontré plusieurs problèmes dans les parties dimensionnement et conception étant donné que peu de travaux sont réalisés en Algérie qui peuvent affirmer les valeurs présentées dans les articles.

Une simulation s'imposait pour répondre en partie à ces problèmes et justifier nos choix et les dimensions des organes sollicités de la machine ; les tiges de guidage, les clavettes, l'outil et le porte-outil. La simulation a montré que les organes de la machine résistent aux efforts de soudage.

En raison du manque de temps, la réalisation de cette machine n'a pas eu lieu. Cette étude conceptuelle, une fois expertisée par les professeurs du département et d'autres experts, pourrait faire l'objet de réalisation par les promotions futures afin de doter le laboratoire de soudage d'un équipement pédagogique et de permettre d'améliorer le prototype au fur et à mesure et l'automatiser afin de pouvoir l'exploiter et d'introduire les paramètres du procédé.

# Références bibliographiques

- [1] N. Z. Khan, A. N. Siddiquee, et Z. A. Khan, *Friction stir welding: dissimilar aluminium alloys*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.
- [2] S. Zimmer, « Contribution à l'industrialisation du soudage par friction malaxage », p. 257, thèse doctorat, Arts et Métiers ParisTech ,2010
- [3] M, Zoghlami, Influence des paramètres du procédé FSW sur les caractéristiques des bandes alternées dans les alliages d'aluminium. PFE, école de technologie supérieure Montréal, 2017
- [5] F, Rezgui, Réalisation d'une machine de soudage par friction malaxage. PFE, université de Biskra Septembre 2020
- [6] R. S. Mishra, *Friction stir welding and processing: science and engineering*. New York: Springer, 2014.
- [7] Abdelaziz Timesli, Simulation du soudage par friction et malaxage à l'aide de méthodes sans maillage. Thèse Université de Lorraine,2013.
- [8]N. Jemal, A. B. Attar, L. Langlois, et S. Zimmer-Chevret, « Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé »,ANR Corouso,2015
- [9] R.S. Mishra et M.W. Mahoney C. B. Fuller, *Friction Stir Welding and Processing*, ASM International ,2007
- [10]F.Dardouri. Dispositif d'assistance associé à des robots manipulateurs utilisés dans des procédés de fabrication/FSW. Automatique / Robotique. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers , 2018.
- [11] N. Mendes, P. Neto, A. Loureiro, et A. P. Moreira, « Machines and control systems for friction stir welding: A review », *Materials & Design*, vol. 90, p. 256-265, janv. 2016, doi: [10.1016/j.matdes.2015.10.124](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.124).
- [12] M.P. Mubiayi,E.T Akinlabi , M.E. Makhatha .Current trends in friction stir welding (FSW) and friction stir spot welding (FSSW). New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [13] M. K. Besharati-Givi, *Advances in friction- stir welding*. Waltham, MA: Elsevier, 2014.
- [14] Maurice Duval, Soudage de l'aluminium par friction malaxage (FSW), centre de soudage FSw , université Québec, 2018
- [15] A. Fleury. Conception en fatigue de joints soudés par friction malaxage dans les tabliers de pont en aluminium, Québec, Canada
- [16] A. B. Attar, « Friction Stir Welding – principes de la technologie et cas d'applications industriels », Institut de Soudure,2016.
- [17]A.K.Hussain, evaluation of parameters of friction stir welding for aluminium aa6351 alloy,International Journal of Engineering Science and Technology.

[26] Xinda Hu ,An Introduction to Stepper Motors, , University of Arizona College of Optical Sciences

[33] K. Elangovan et V. Balasubramanian, « Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy », *Journal of Materials Processing Technology*, mai 2008

[34] N. Jemal, A. B. Attar, L. Langlois, et S. Zimmer-Chevret, « Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé », p. 82.

[39] EL FERTAS Manyl Arslene, HADJI M'hamed Taha. Contribution au développement du procédé de soudage par friction malaxage (FSW) sur des tôles en aluminium sans atteindre le point de fusion. Projet de fin d'étude, Département de Construction Mécanique et Productique, USTHB. Alger, 2007.

[41] Trimble, Daniel & Monaghan, John & O'Donnell, G.E.. (2012). Force generation during friction stir welding of AA2024-T3. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 61. 9–12. 10.1016/j.cirp.2012.03.024.

#### **Sites internet :**

[4] « Soudage par friction-malaxage | Institut Belge de la Soudure asbl ». <https://bib-ibs.be/fr/publicatie/soudage-par-friction-malaxage> (consulté le 15 avril 2022).

[18]« ▷ Synchronous And Asynchronous Motors – Where To Use Them? » <https://engineering.electrical-equipment.org/energy-efficiency-motors/synchronous-and-asynchronous-motors.html> (consulté le 02 juin 2022).

[19] « Moteur synchrone - Energie Plus Le Site ». <https://energieplus-lesite.be/techniques/ascenseurs7/moteur-synchrone/> (consulté le 02 juin 2022).

[20] « Moteur synchrone - Energie Plus Le Site ». <https://energieplus-lesite.be/techniques/ascenseurs7/moteur-synchrone/> (consulté le 03 juin 2022).

[21] « Moteur synchrone et asynchrone : quelles différences ? » <https://www.motac.fr/blog/2018/02/16/moteur-synchrone-et-asynchrone-queelles-differences> (consulté le 06 juin 2022).

[22] « qu'est-ce qu'un moteur asynchrone : construction et fonctionnement ». <https://fr.jf-parede.pt/what-is-an-asynchronous-motor> (Consulté le 03 juin 2022).

[23] « stepper motor basics », FAULHABER

[https://www.faulhaber.com/fileadmin/user\\_upload\\_global/support/MC\\_Support/Motors/App\\_Notes/Faulhaber\\_AN001\\_EN.pdf](https://www.faulhaber.com/fileadmin/user_upload_global/support/MC_Support/Motors/App_Notes/Faulhaber_AN001_EN.pdf)

[24] « Stepper Motor : Construction, Working, Types and Its Applications ». <https://www.elprocus.com/stepper-motor-types-advantages-applications/> (consulté le 24 juin 2022).

[27] « Séquence 3 : Sciences de l'Ingénieur - Système pignon-crémaillère ». <http://pedagogie.ac->

[limoges.fr/sti\\_si/accueil/FichesConnaissances/Sequence3SSi/co/S3B22\\_Association\\_modele\\_composant\\_15.html](http://limoges.fr/sti_si/accueil/FichesConnaissances/Sequence3SSi/co/S3B22_Association_modele_composant_15.html) (consulté le 04 juin 2022).

[28] « Ball Screw: What Is It? How Does It Work? Lead Screws ». <https://www.iqsdirectory.com/articles/ball-screws.html> (consulté le 24 juin 2022).

[29] «How do Ball Screws work? | Heason ». <https://www.heason.com/news-media/technical-blog-archive/how-do-ball-screws-work-> (consulté le 24 juin 2022).

[31] « Ball Bushings from igus® UK ». <https://www.igus.co.uk/info/glossary-ball-bushings> (consulté le 20 juin 2022).

[32] « Ball Bushings | NTN SNR ». <https://www.ntn-snr.com/ball-bushings> (consulté le 20 juin 2022).

[35] « Tapered Roller Bearings: A Comprehensive Guide | Tameson.com ». <https://tameson.com/tapered-bearing.html> (consulté le 23 juin 2022).

[36] « Ball Bearings: Types, Design, Function, and Benefits ». <https://www.iqsdirectory.com/articles/ball-bearing.html> (consulté le 22 juin 2022).

[37] « Types of Couplings | Fractory ». <https://fractory.com/types-of-couplings/> (consulté le 25 juin 2022).

[38] « Couplings are key components for mechanical motion projects. » <https://www.motionsolutions.com/products/mechanical/couplings/> (consulté le 25 juin 2022).

[40] EuroExpos. <https://www.euro-expos.com/fr/atelier/guides/puissance-demarrage-coefficient-25.html>. Consulté le : 07/06/2022.

[42] H7g6 : Le site des concepteurs. Les clavettes parallèles. <https://www.h7g6.fr/data/article/5/clavettes-paralleles>. Consulté le 22/05/2022.

### Liste des catalogues :

[Cat1] Electro-Industries, « Fiche Technique Produit », édition mars 2016.

[Cat2] SKF, « vis à billes de précision à filet roulé », édition 2013.

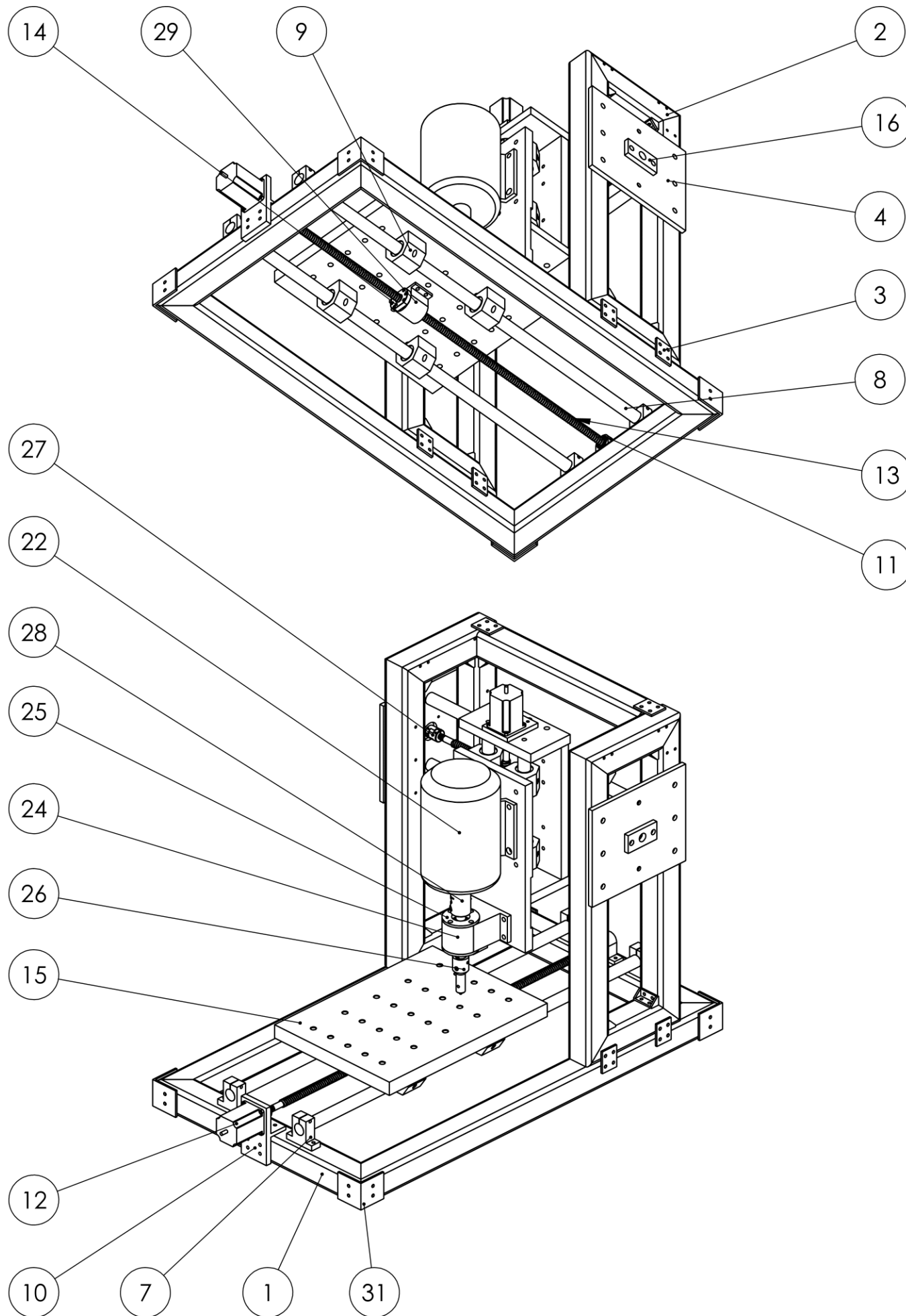
[Cat3] Chevalier : Guide du Dessinateur Industriel.

[Cat4] stepper motor, Application Note DK9222-0410-0014, Motion Control, Stepper motor [https://download.beckhoff.com/download/document/Application\\_Notes/DK9222-0410-0014.pdf](https://download.beckhoff.com/download/document/Application_Notes/DK9222-0410-0014.pdf)

[Cat5] Achneeberger linear technology « guidages linéaires et patins ».



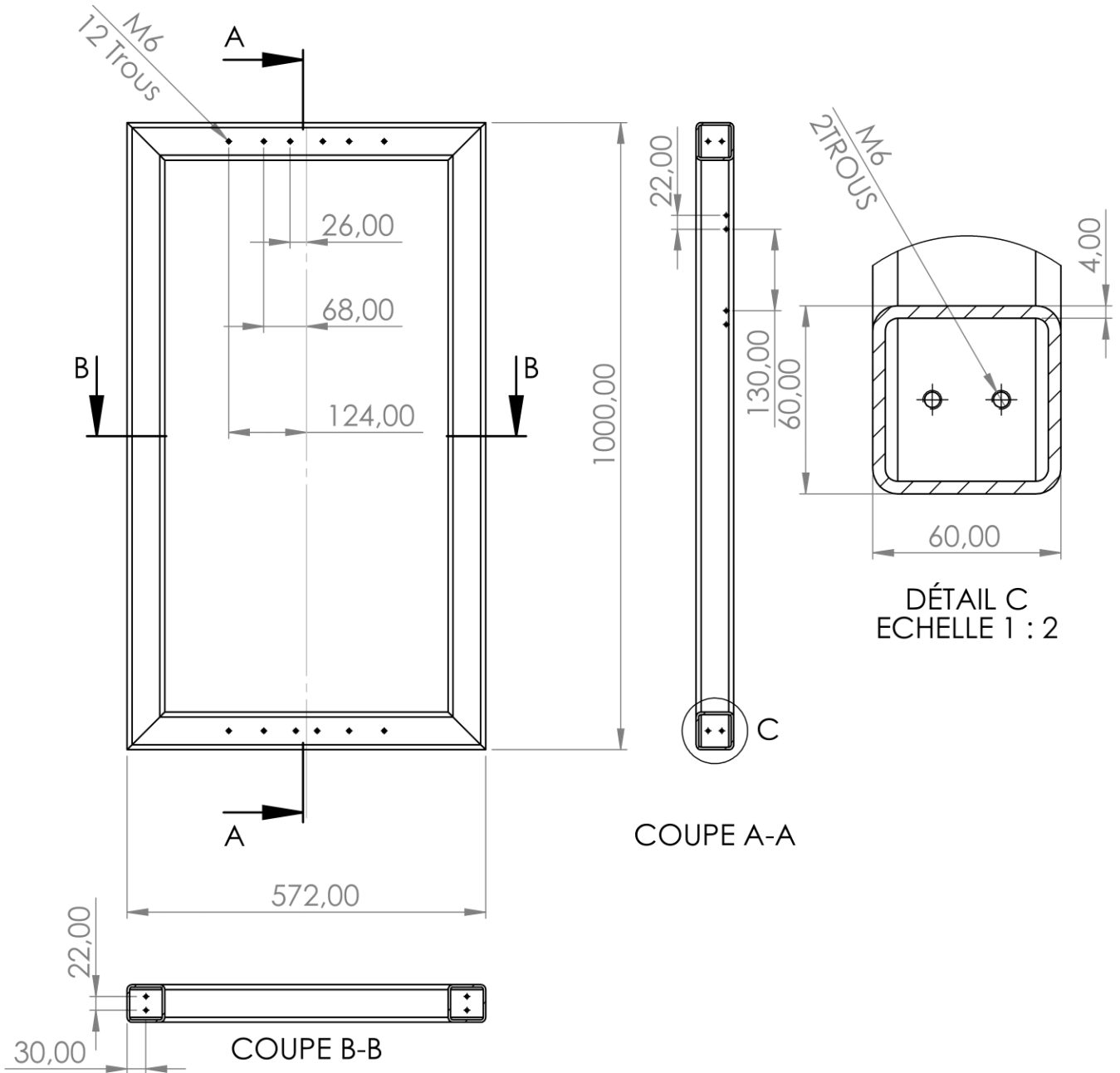
# **Annexe**



|             |                               |   |     |
|-------------|-------------------------------|---|-----|
| 30          | Traverse                      | Acier E295/Profilé carré 60×60×4                            | 1   |
| 29          | Logement Douille vis à billes | Acier C45   | 3   |
| 28          | Accouplement rigide           | Accouplement rigide-19×76                                   | 1   |
| 27          | Accouplement flexible         | Accouplement flexible-8×10×30                               | 3   |
| 26          | Outil                         | Acier à outil X39CrMoV5                                     | 1   |
| 25          | Bride                         | Acier C45   | 2   |
| 24          | Logement                      | Acier C45   | 1   |
| 23          | Arbre-porte-outil             | Acier C45   | 1   |
| 22          | Moteur asynchrone             | Moteur asynchrone triphasé 1,1kW-3000tr/min, type-083-2, B3 | 1   |
| 21          | Plaque avant                  | Alliage d'aluminium   | 1   |
| 20          | Bride moteur Z                | Acier C45   | 1   |
| 19          | Plaque basse                  | Alliage d'aluminium   | 1   |
| 18          | Plaque haute                  | Alliage d'aluminium   | 1   |
| 17          | Plaque arrière                | Alliage d'aluminium   | 1   |
| 16          | Palier roulement Y            | Acier C45   | 1   |
| 15          | Table de travail              | Alliage d'aluminium   | 1   |
| 14          | Douille vis à billes          | Douille d=16  | 3   |
| 13          | Vis à billes                  | Vis à bille d=16, p=5                                       | 3   |
| 12          | Moteur pas à pas              | Nema 23-57HS7630B4D8  | 3   |
| 11          | Palier roulement X            | Acier C45   | 1   |
| 10          | Bride moteur X                | Acier C45   | 1   |
| 9           | Palier roulement linéaire     | Roulement linéaire LUJR 25                                  | 12  |
| 8           | Tige Glissière                | Tige acier inoxydable d=25                                  | 6   |
| 7           | Support d'arbre linéaire      | Support d'arbre linéaire SK25                               | 4   |
| 6           | Gousset du coin intérieur     | Acier de construction                                       | 10  |
| 5           | Plaque gauche                 | Acier de construction                                       | 1   |
| 4           | Plaque droite                 | Acier de construction                                       | 1   |
| 3           | Gousset plat                  | Acier de construction                                       | 10  |
| 2           | Cadre du châssis vertical     | Acier E295/Profilé carré 60×60×4                            | 2   |
| 1           | Cadre du châssis bas          | Acier E295/Profilé carré 60×60×4                            | 1   |
| No. ARTICLE | Nom de la pièce               | Description/Désignation                                     | QTE |

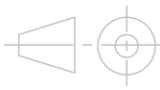
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

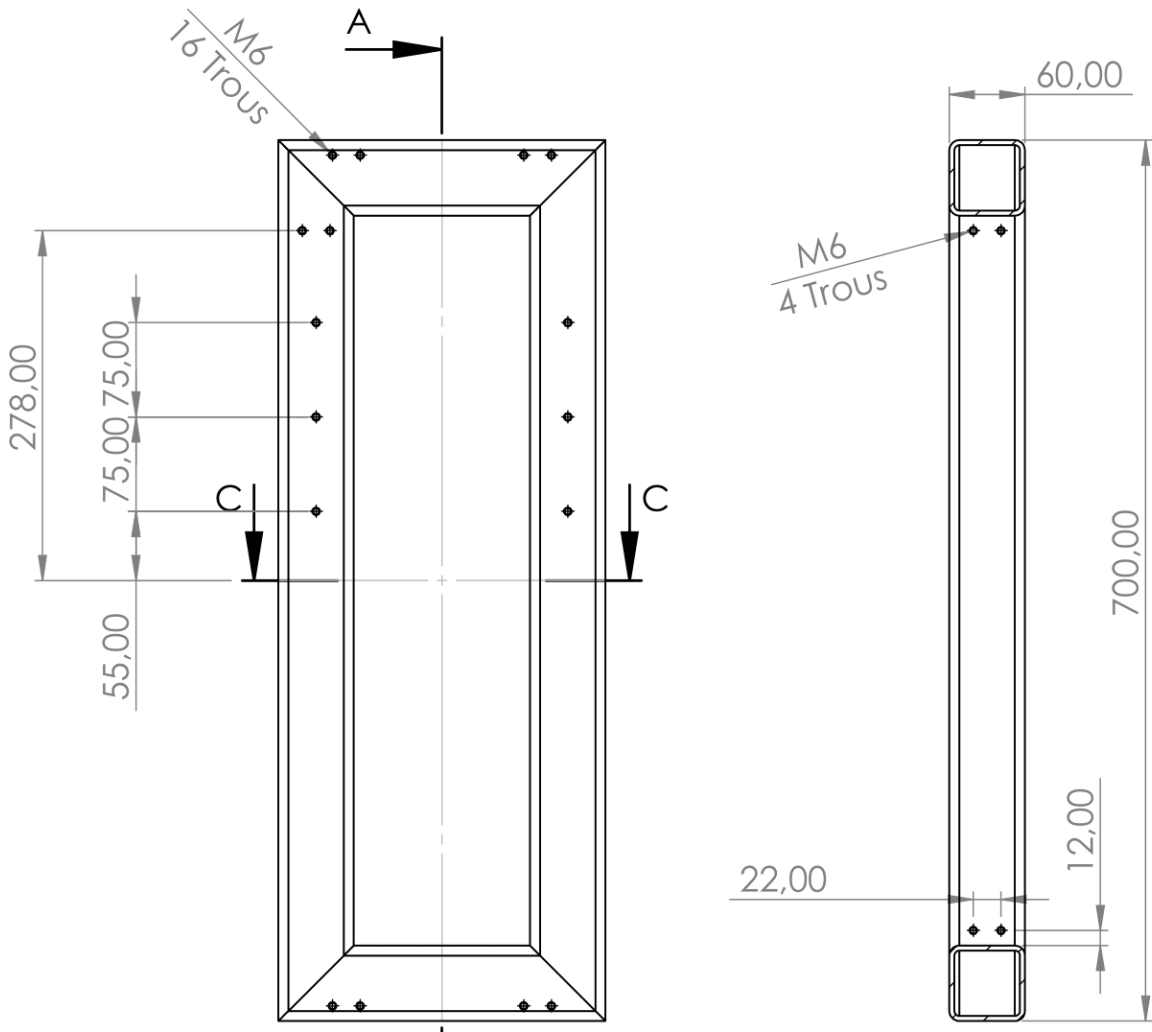
|           |           |          |             |                                |
|-----------|-----------|----------|-------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE   |          | Machine FSW | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 1:10      | -         |          |             |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS   | MUSTAPHA |             |                                |
| ETUDIANT  | SMALI     | LYES     | QUANTITE: 1 | DATE:26/06/2022                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA | MOHAMED  |             |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI     | DJAMEL   |             |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL    | HAMID    |             |                                |



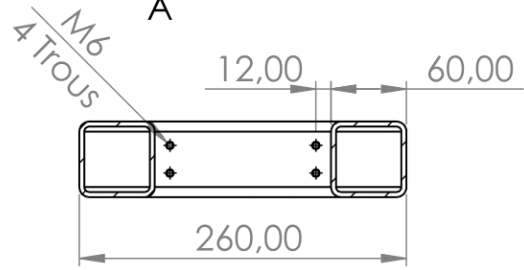
Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra 6,3}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

|           |           |   |                      |                                |
|-----------|-----------|---|----------------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE   |  | Cadre du châssis bas | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 1:10      | E259      |   |                      |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS   | MUSTAPHA  |                      |                                |
| ETUDIANT  | SMALI     | LYES  |                      |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA | MOHAMED   |                      |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI     | DJAMEL  |                      |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL    | HAMID   | QUANTITE: 1          | DATE:22/06/2022                |



COUPE A-A

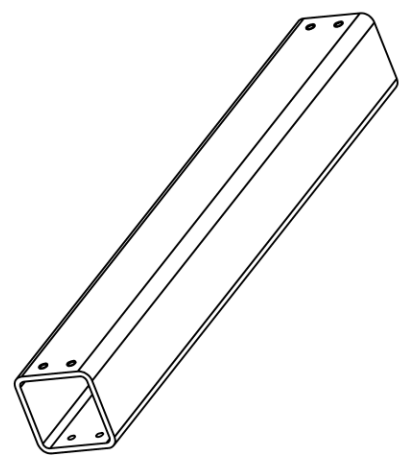
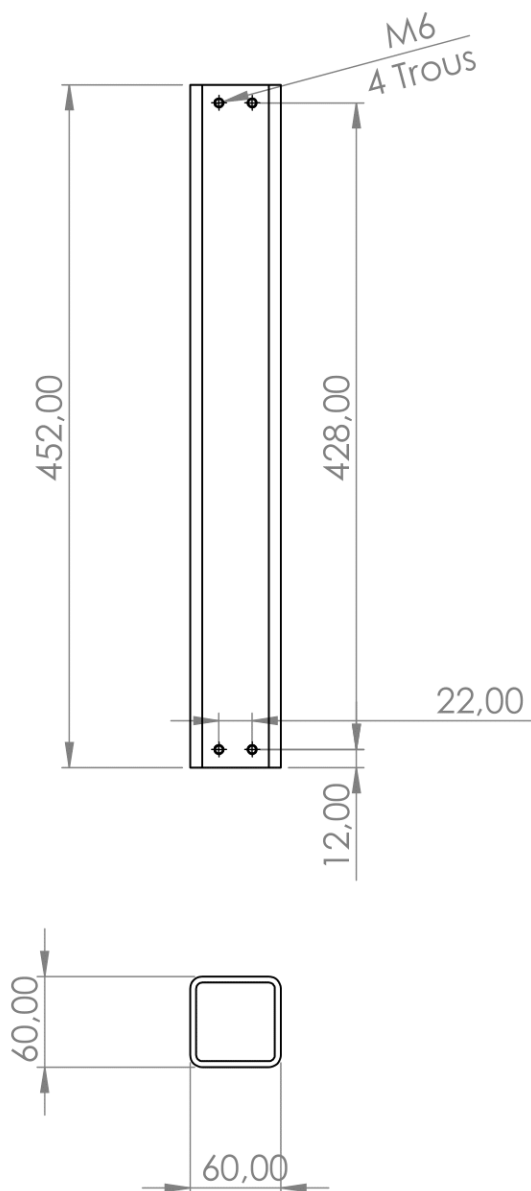


COUPE C-C

Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra\ 6,3}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

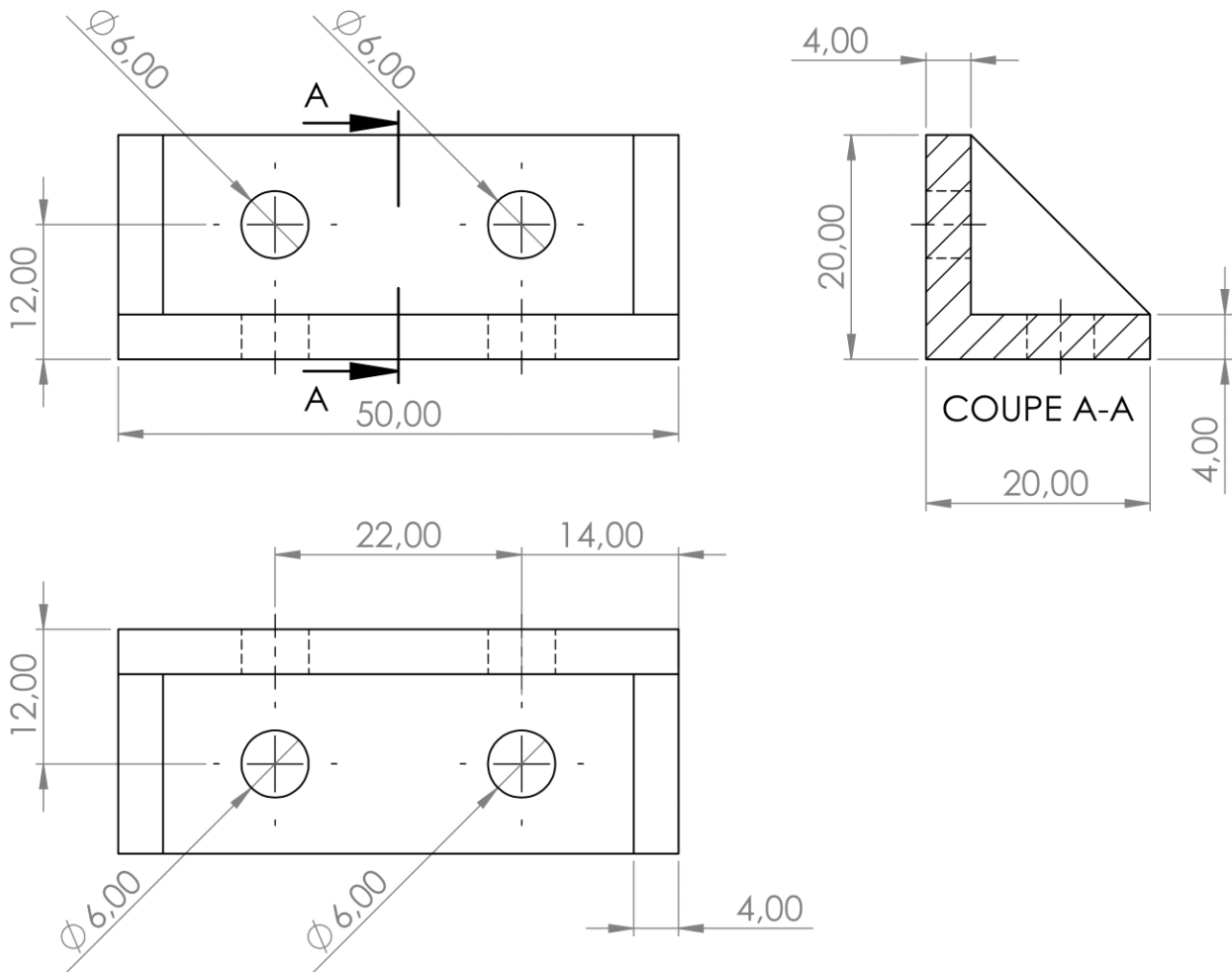
|           |           |          |                           |                                |
|-----------|-----------|----------|---------------------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE   |          | Cadre du châssis vertical | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 1:6       | E259      |          |                           |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS   | MUSTAPHA |                           |                                |
| ETUDIANT  | SMALI     | LYES     |                           |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA | MOHAMED  |                           |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI     | DLAMEL   | QUANTITE: 2               | DATE:22/06/2022                |
| PROMOTEUR | SEDJAL    | HAMID    |                           |                                |



Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra\ 6,3}$  Partout sauf indiqué

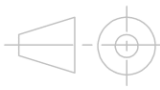
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

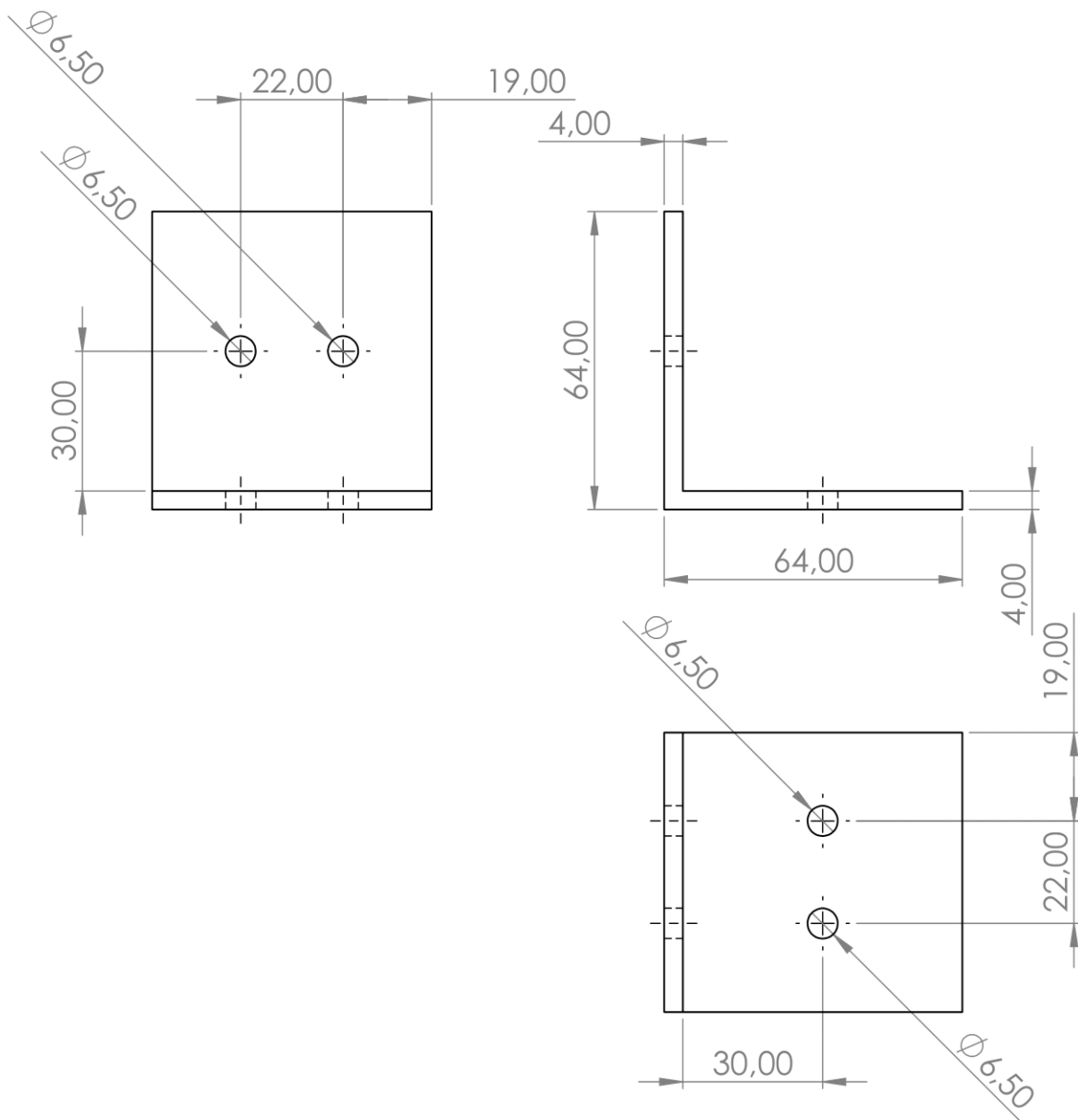
|           |           |          |                                    |  |
|-----------|-----------|----------|------------------------------------|--|
| ECHELLE   | MATIERE   |          | <p>Traverse</p> <p>QUANTITE: 1</p> | <p>DEPATEMENT<br/>GENIE MECANIQUE</p> <p>DATE:22/06/2022</p> |
| 1:5       | E259      |          |                                    |  |
| ETUDIANT  | KEDDOUS   | MUSTAPHA |                                    |  |
| ETUDIANT  | SMALI     | LYES     |                                    |  |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA | MOHAMED  |                                    |  |
| PROMOTEUR | SAIDI     | DJAMEL   |                                    |  |
| PROMOTEUR | SEDJAL    | HAMID    |                                    |  |



Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra 6,3}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

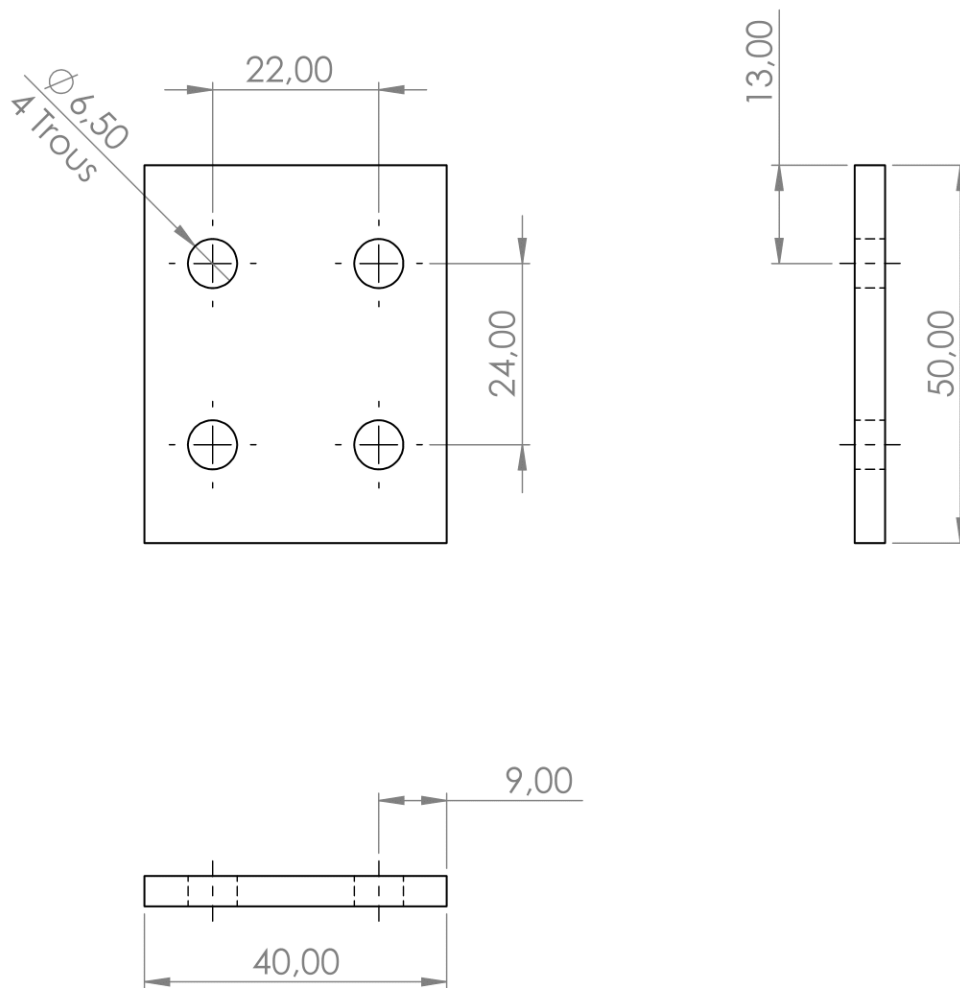
|           |             |   |                              |                                |
|-----------|-------------|---|------------------------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE     |  | Gousset du coin<br>intérieur | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 3:2       | Acier Const |   |                              |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS     | MUSTAPHA  |                              |                                |
| ETUDIANT  | SMALI       | LYES  |                              |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA   | MOHAMED   |                              |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI       | DJAMEL  |                              |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL      | HAMID   | QUANTITE: 10                 | DATE:22/06/2022                |



Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra\ 6,3}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

|           |             |          |                           |                                |
|-----------|-------------|----------|---------------------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE     |          | Gousset du coin extérieur | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 2:3       | Acier Const |          |                           |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS     | MUSTAPHA |                           |                                |
| ETUDIANT  | SMALI       | LYES     |                           |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA   | MOHAMED  | QUANTITE: 4               | DATE:22/06/2022                |
| PROMOTEUR | SAIDI       | DJAMEL   |                           |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL      | HAMID    |                           |                                |

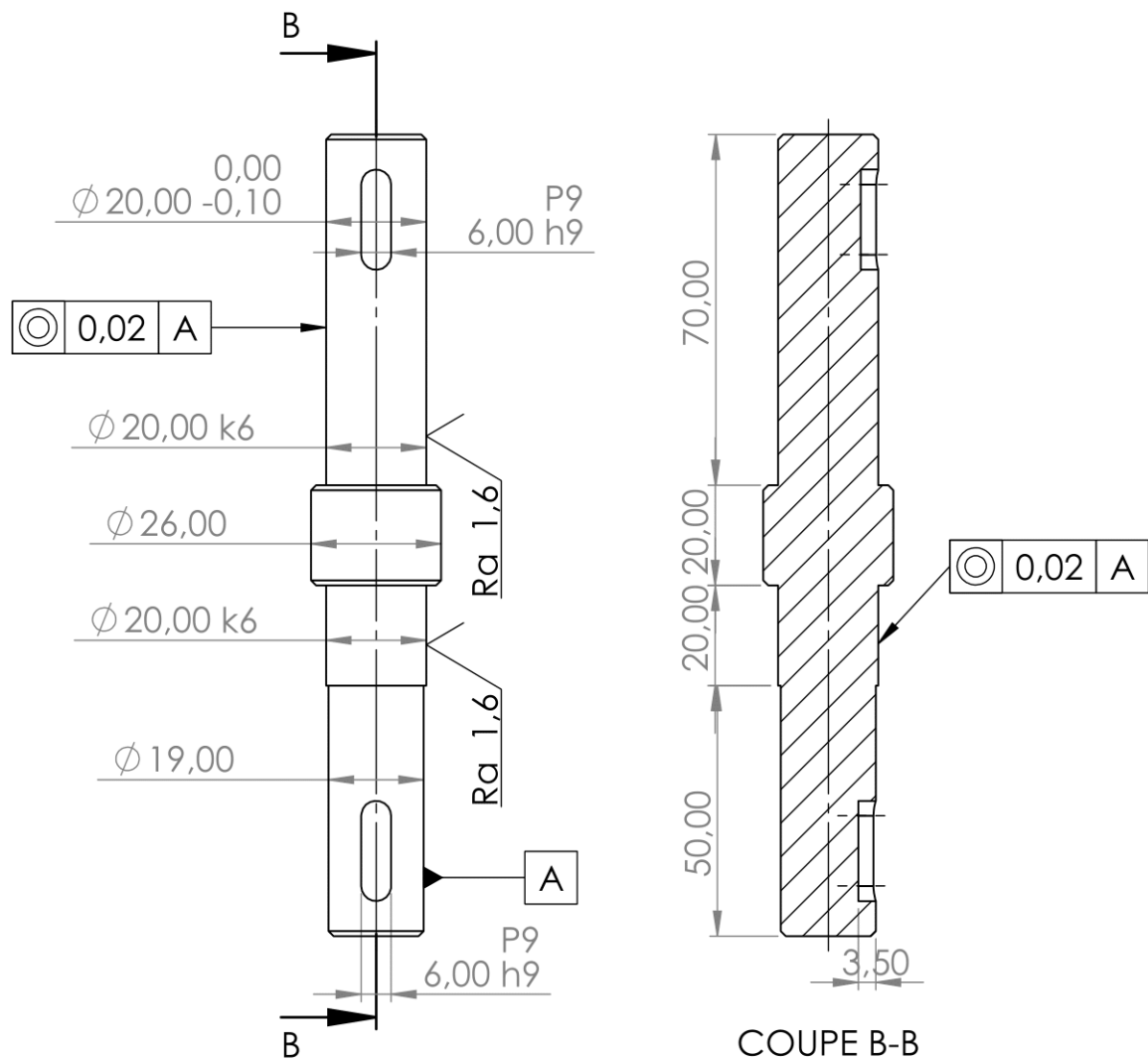


Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra\ 6,3}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

|           |             |   |              |                                |
|-----------|-------------|---|--------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE     |  | Gousset plat | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 1:2       | Acier Const |   |              |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS     | MUSTAPHA  |              |                                |
| ETUDIANT  | SMAILI      | LYES  |              |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA   | MOHAMED   | QUANTITE: 10 | DATE:22/06/2022                |
| PROMOTEUR | SAIDI       | DJAMEL  |              |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL      | HAMID   |              |                                |

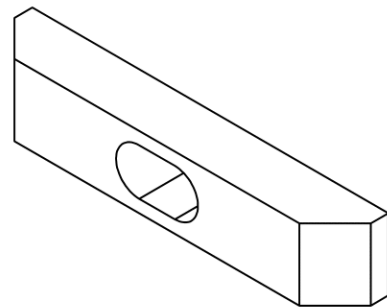
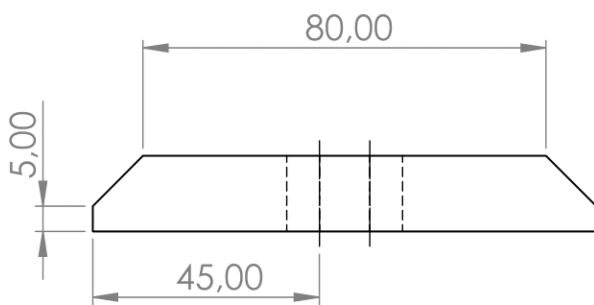
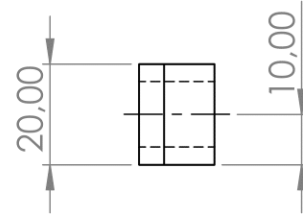
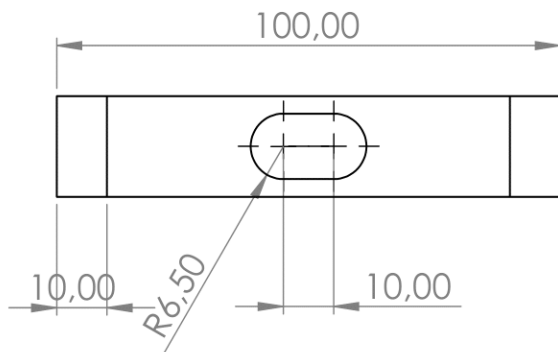




Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{\text{Ra } 3,6}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

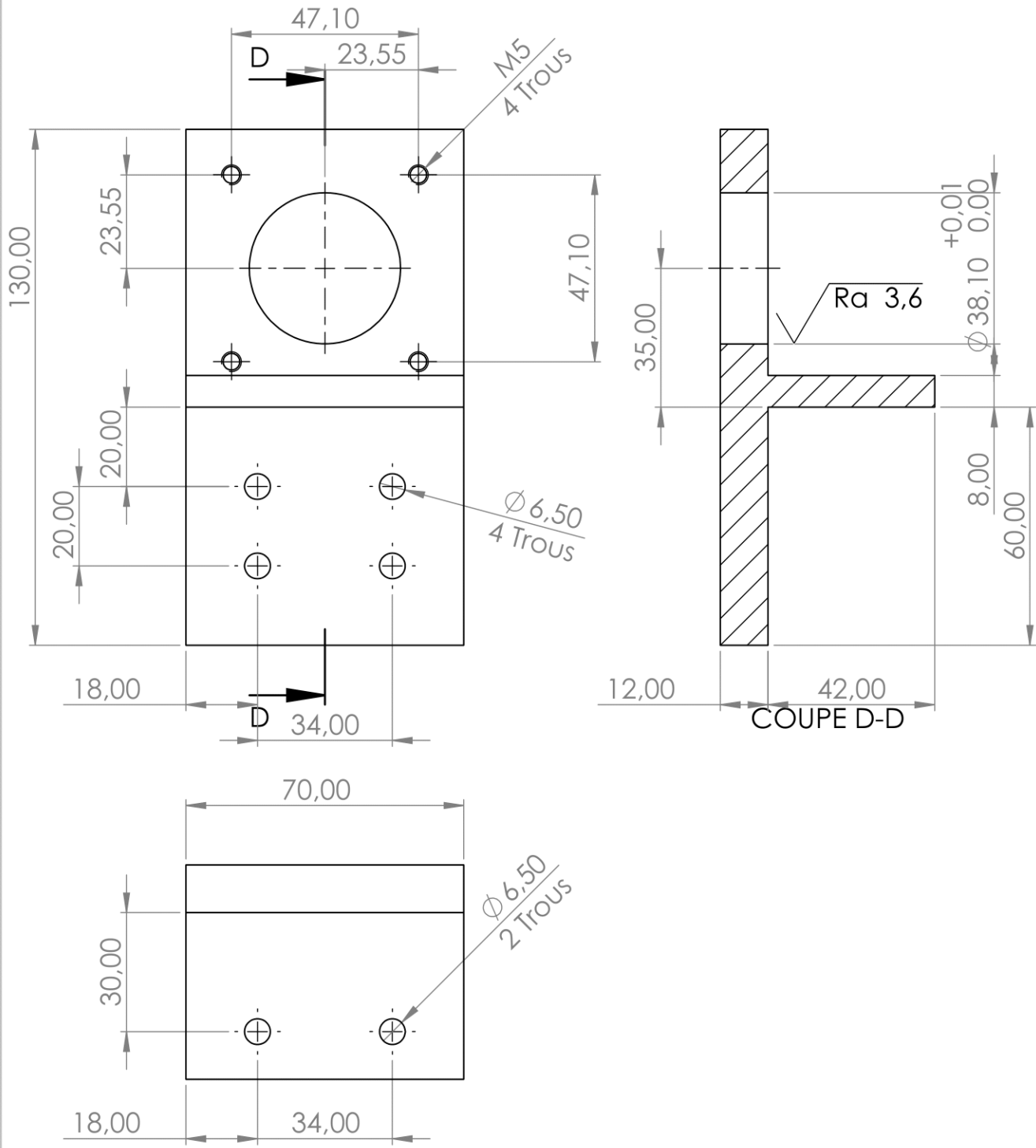
|           |           |          |                   |                                |
|-----------|-----------|----------|-------------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE   |          | Arbre-porte-outil | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 2:3       | C45       |          |                   |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS   | MUSTAPHA |                   |                                |
| ETUDIANT  | SMALI     | LYES     |                   |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA | MOHAMED  | QUANTITE: 1       | DATE: 17/06/2022               |
| PROMOTEUR | SAIDI     | DJAMEL   |                   |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL    | HAMID    |                   |                                |



Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra\ 6,3}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

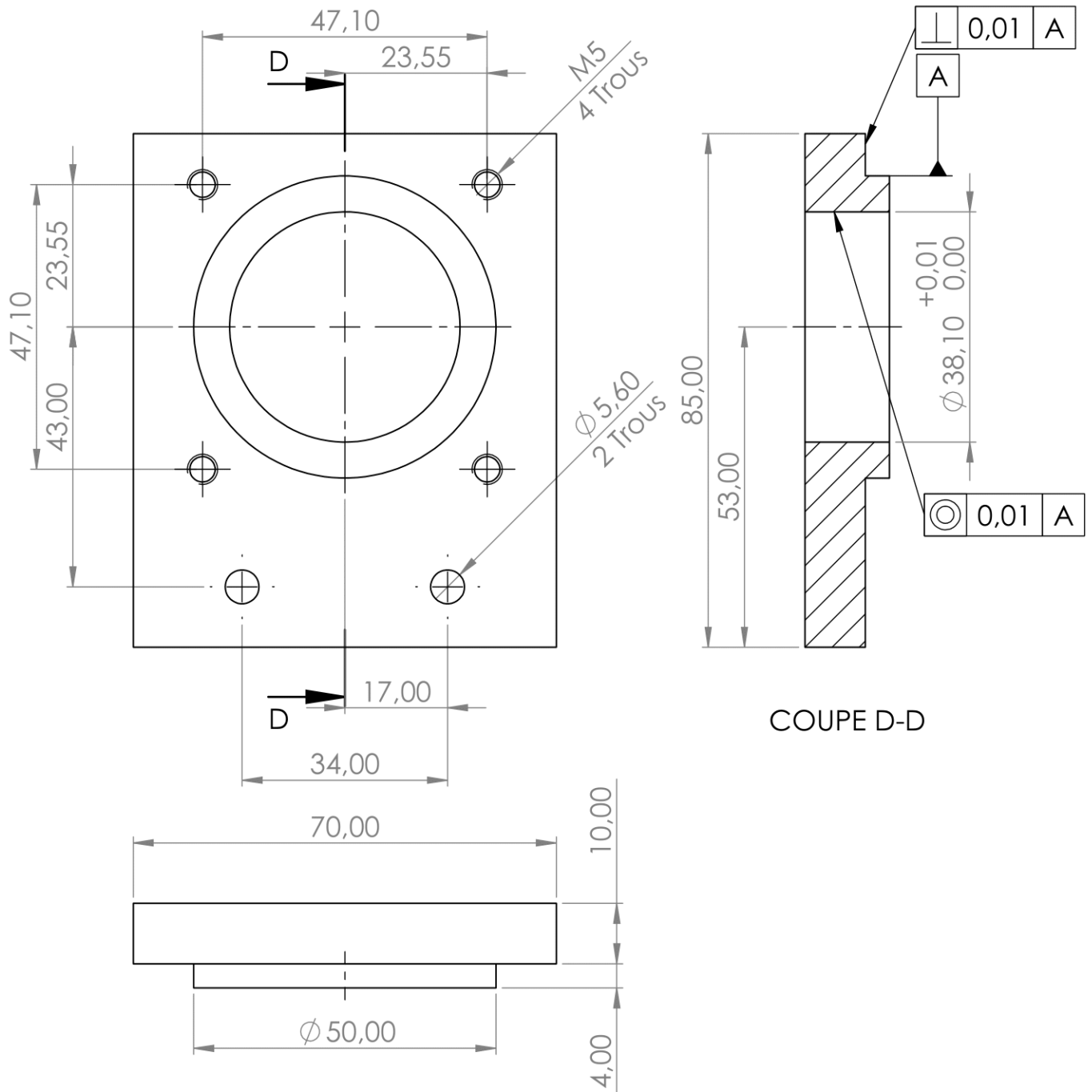
|           |             |          |                   |                                |
|-----------|-------------|----------|-------------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE     |          | Bride de fixation | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 2:3       | Acier Const |          |                   |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS     | MUSTAPHA |                   |                                |
| ETUDIANT  | SMAILI      | LYES     |                   |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA   | MOHAMED  |                   |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI       | DJAMEL   |                   |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL      | HAMID    | QUANTITE: 4       | DATE: 17/06/2022               |



Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra 6,3}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

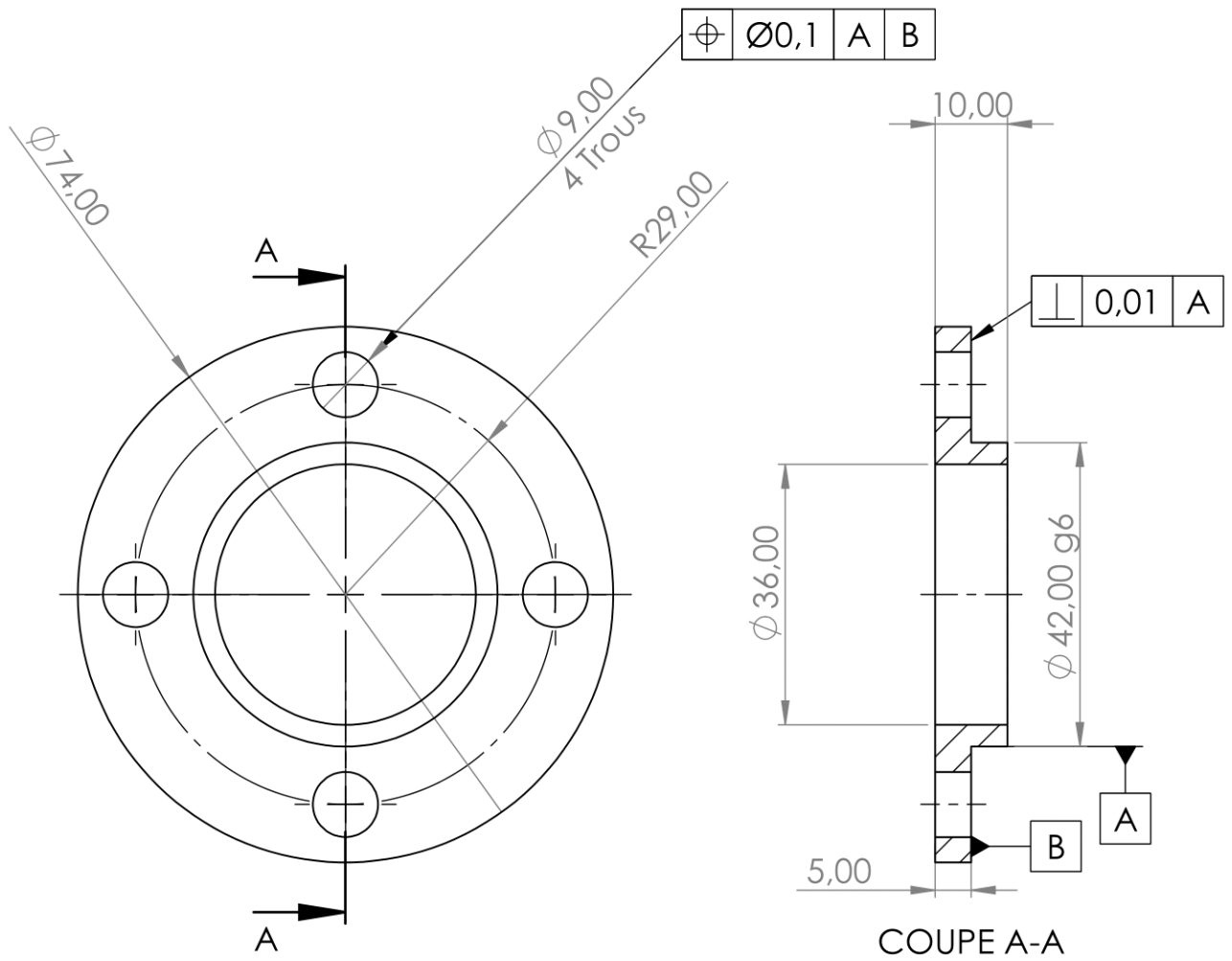
|           |           |          |                |                                |
|-----------|-----------|----------|----------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE   |          | Bride moteur X | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 2:3       | C45       |          |                |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS   | MUSTAPHA |                |                                |
| ETUDIANT  | SMALI     | LYES     |                |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA | MOHAMED  |                |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI     | DJAMEL   |                |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL    | HAMID    | QUANTITE: 1    | DATE:25/06/2022                |



Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra 3,6}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

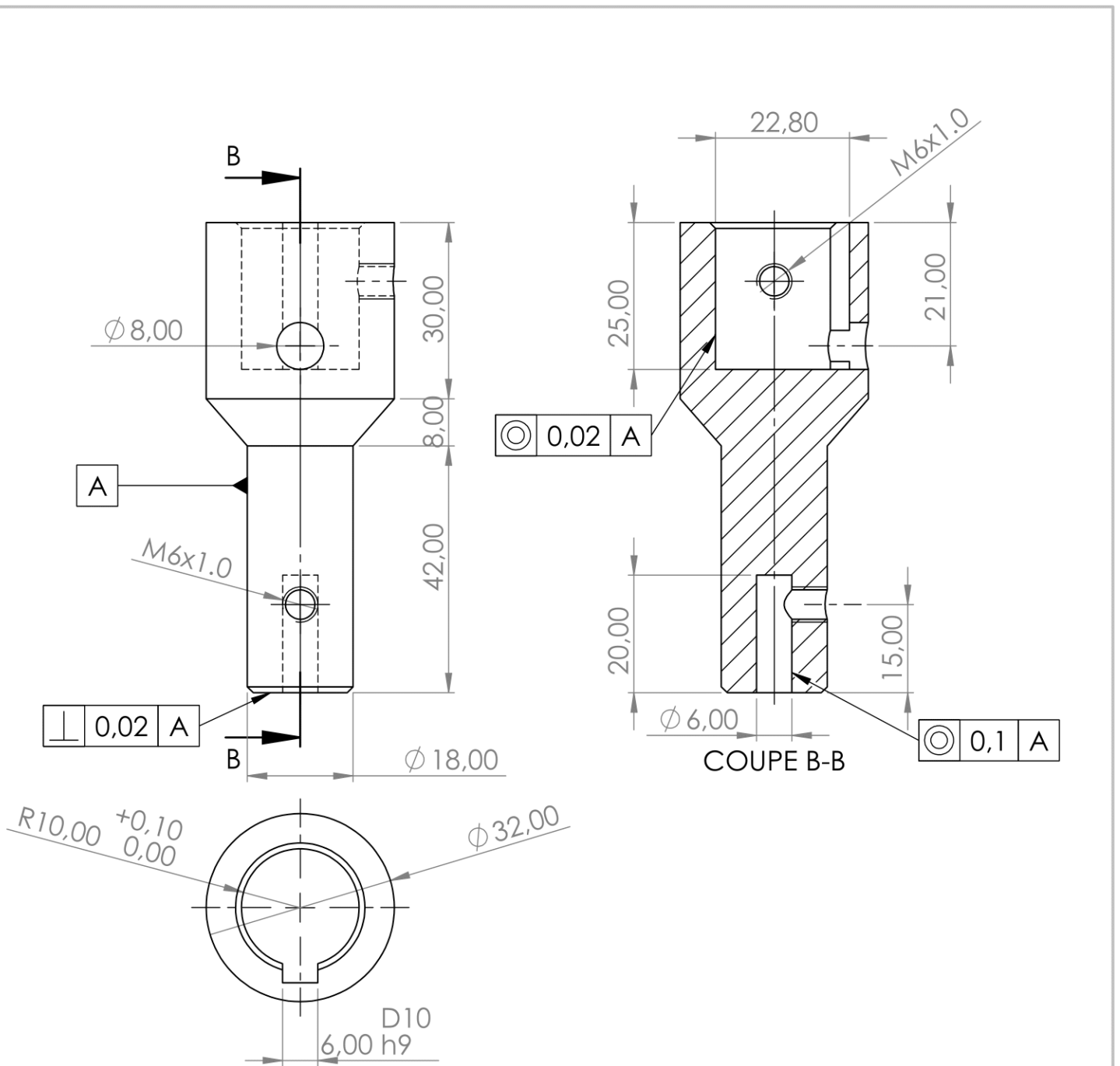
|           |           |          |                |                                |
|-----------|-----------|----------|----------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE   |          | Bride moteur Z | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 1:1       | C45       |          |                |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS   | MUSTAPHA |                |                                |
| ETUDIANT  | SMALI     | LYES     |                |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA | MOHAMED  |                |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI     | DJAMEL   |                |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL    | HAMID    | QUANTITE: 1    | DATE:25/06/2022                |



Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra\ 3,6}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

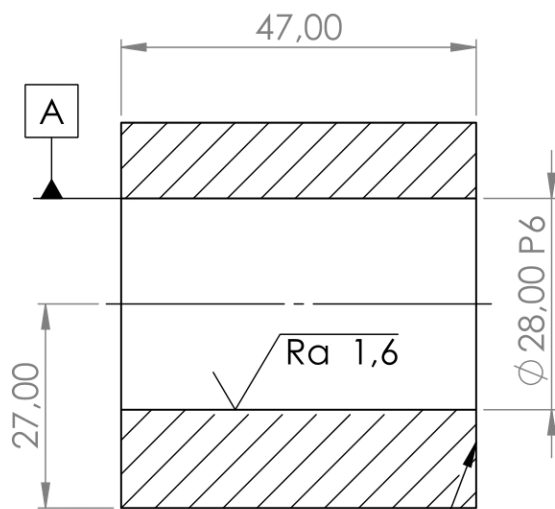
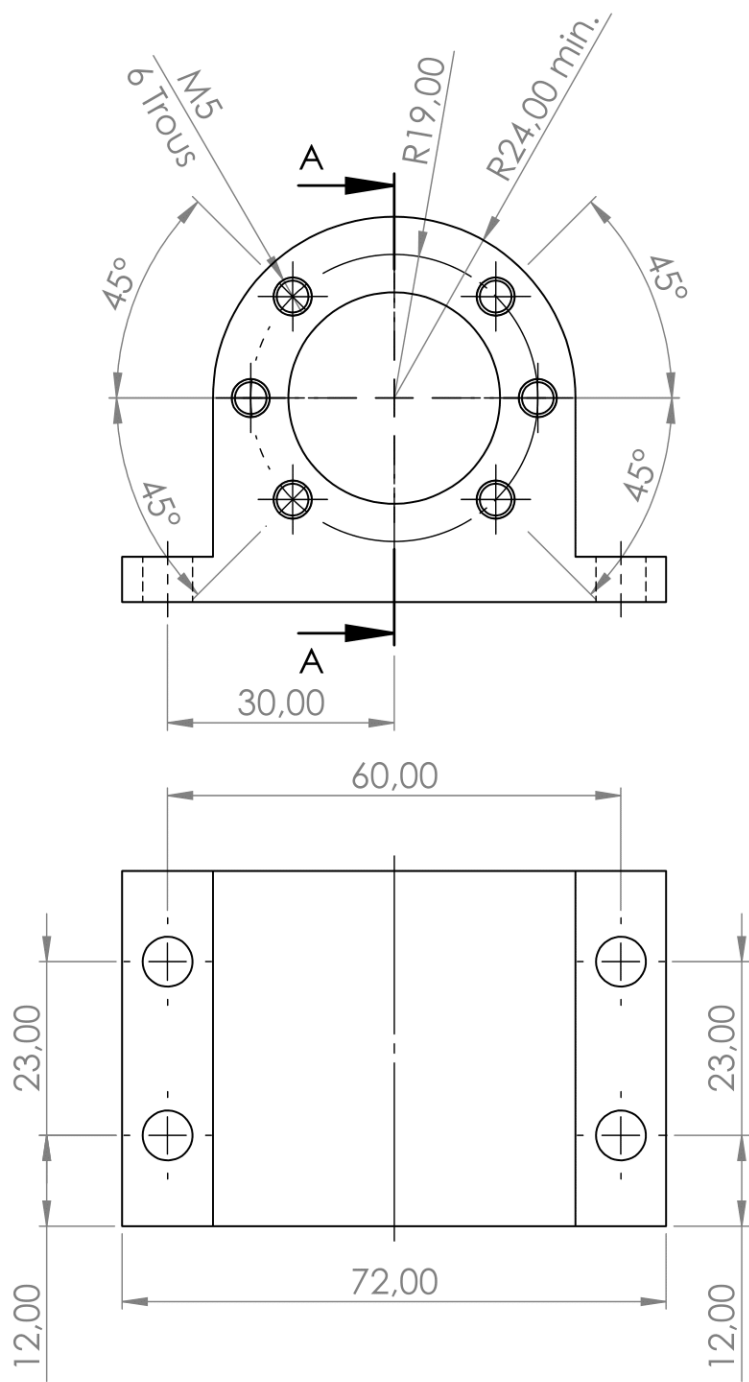
|           |           |          |             |                                |
|-----------|-----------|----------|-------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE   |          | Bride       | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 1:1       | C45       |          |             |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS   | MUSTAPHA |             |                                |
| ETUDIANT  | SMALI     | LYES     |             |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA | MOHAMED  |             |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI     | DJAMEL   |             |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL    | HAMID    | QUANTITE: 2 | DATE:17/06/2022                |



Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra 3,6}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

|           |           |          |                  |                                |
|-----------|-----------|----------|------------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE   |          | Corps de l'outil | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 1:1       | X39CrMoV5 |          |                  |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS   | MUSTAPHA |                  |                                |
| ETUDIANT  | SMALI     | LYES     | QUANTITE: 1      | DATE: 16/06/2022               |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA | MOHAMED  |                  |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI     | DJAMEL   |                  |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL    | HAMID    |                  |                                |



COUPE A-A

⊥ 0,01 A

Tolérance  $\pm 0,1$

Etat de surface

$\sqrt{Ra\ 3,6}$

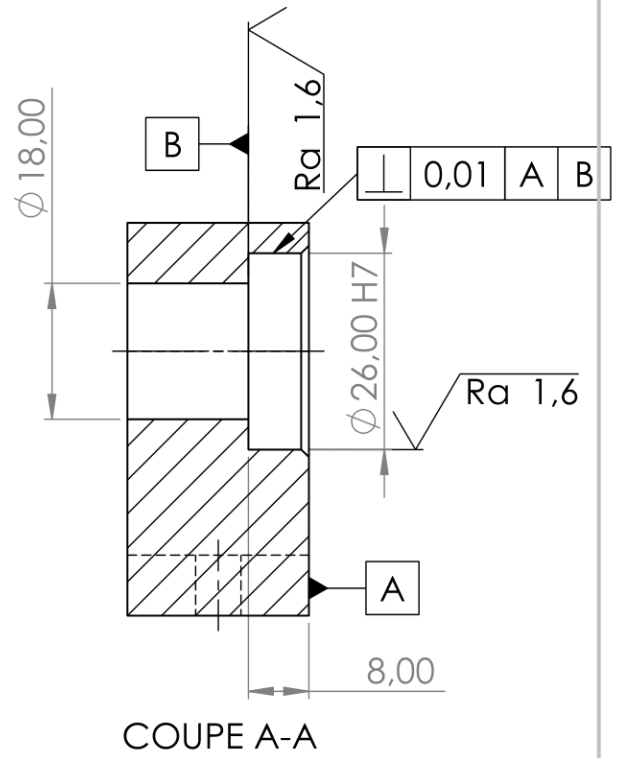
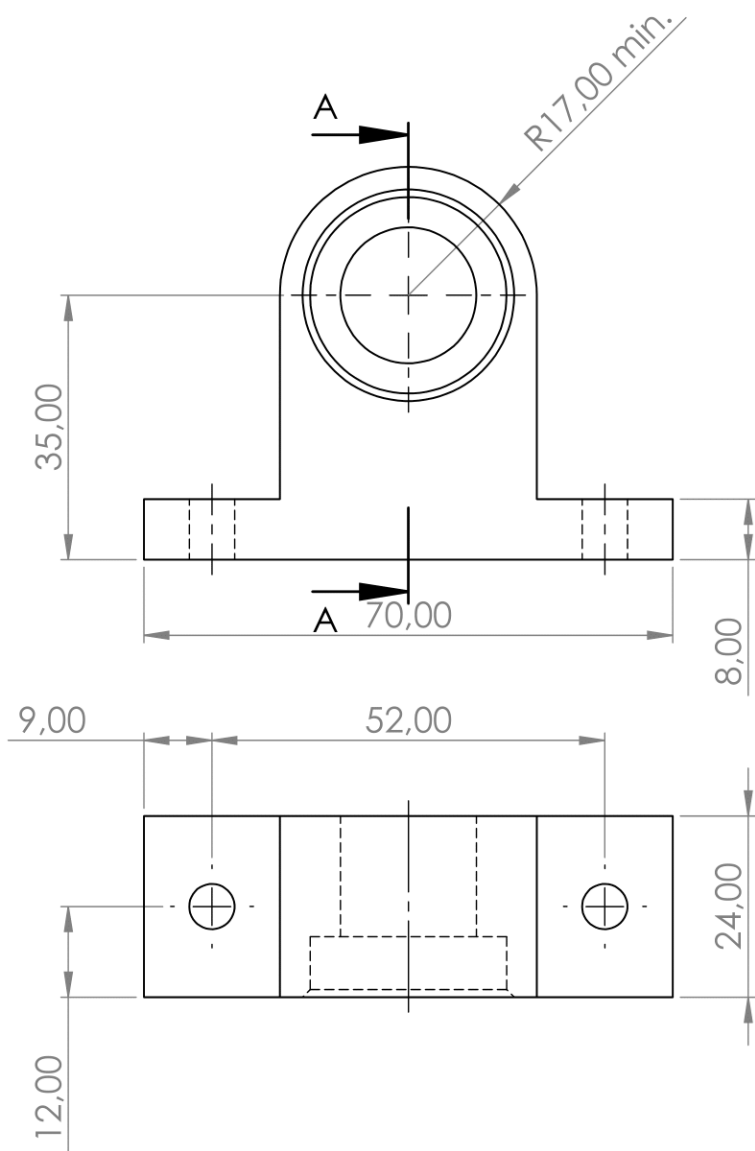
Partout sauf indiqué

ECOLE

NATIONALE

POLYTECHNIQUE

|           |           |          |                               |                                |
|-----------|-----------|----------|-------------------------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE   |          | Logement douille vis à billes | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 1:1       | C45       |          |                               |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS   | MUSTAPHA |                               |                                |
| ETUDIANT  | SMALI     | LYES     |                               |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA | MOHAMED  |                               |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI     | DJAMEL   |                               |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL    | HAMID    | QUANTITE: 3                   | DATE:21/06/2022                |

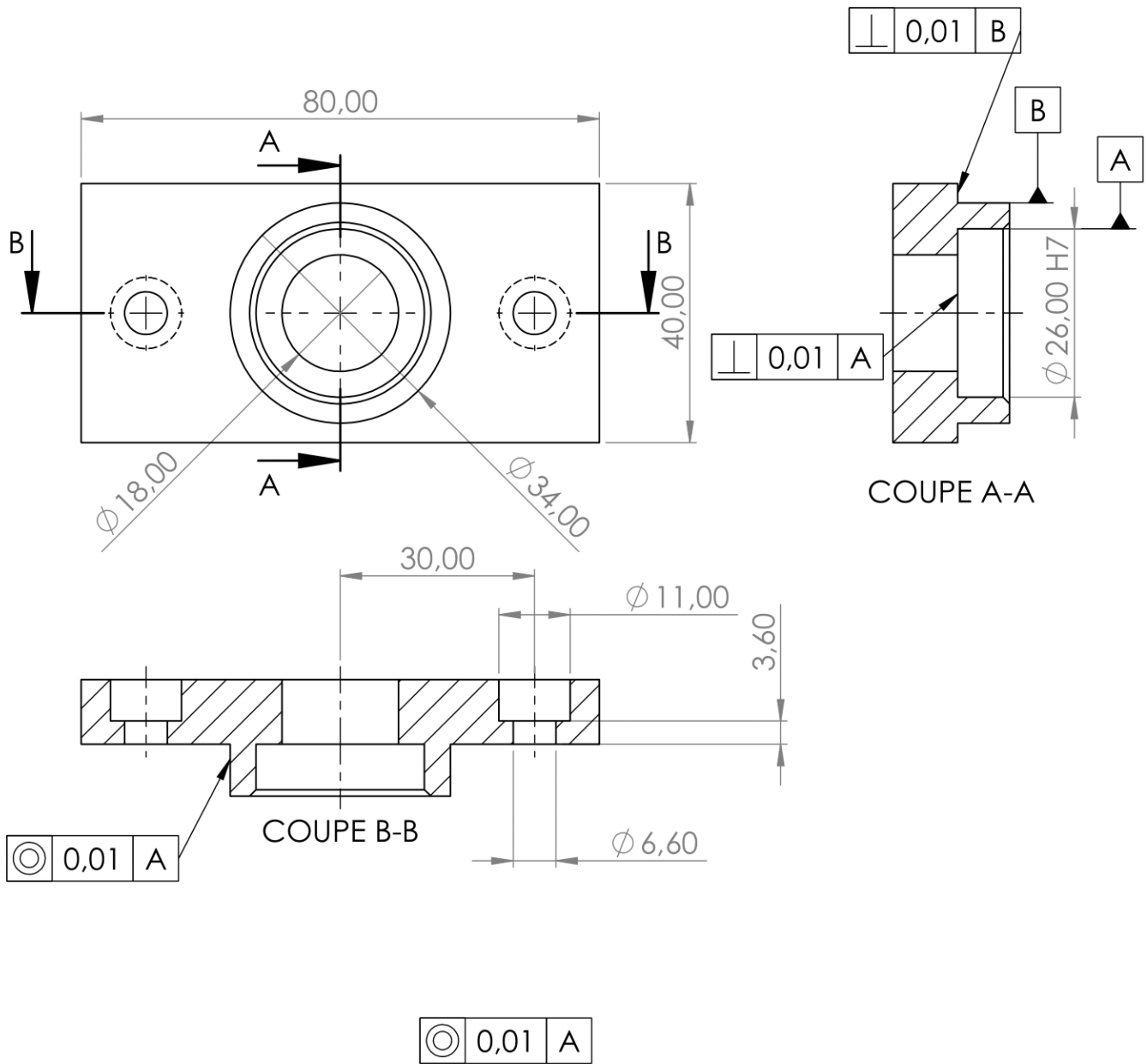


Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra\ 3,6}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

|           |           |          |                    |                                |
|-----------|-----------|----------|--------------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE   |          | Palier roulement X | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 1:1       | C45       |          |                    |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS   | MUSTAPHA |                    |                                |
| ETUDIANT  | SMALI     | LYES     |                    |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA | MOHAMED  |                    |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI     | DJAMEL   |                    |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL    | HAMID    | QUANTITE: 1        | DATE:21/06/2022                |

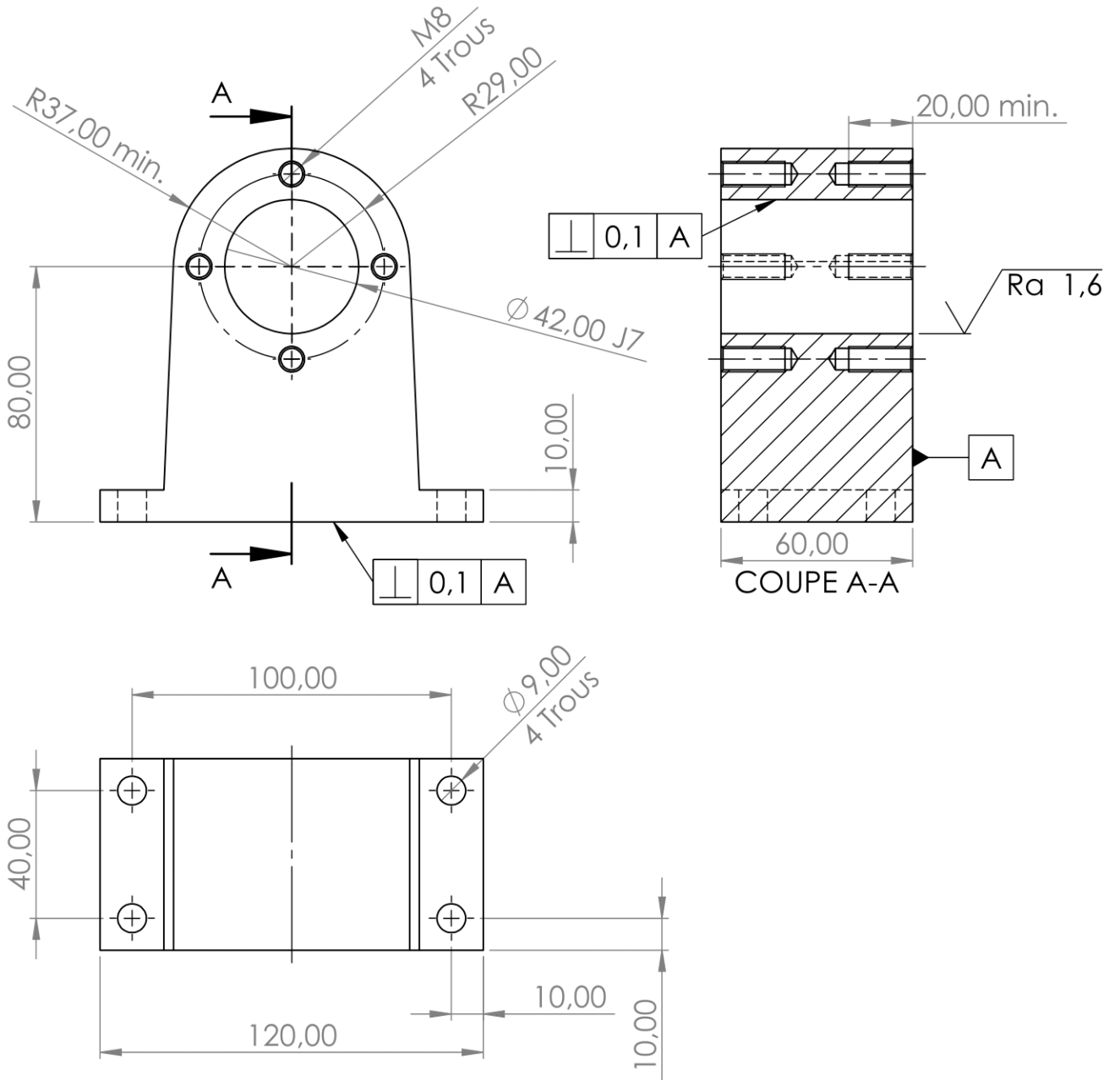




Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra 3,6}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

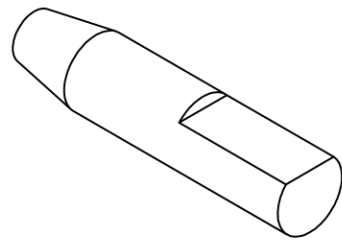
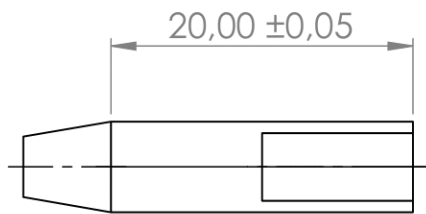
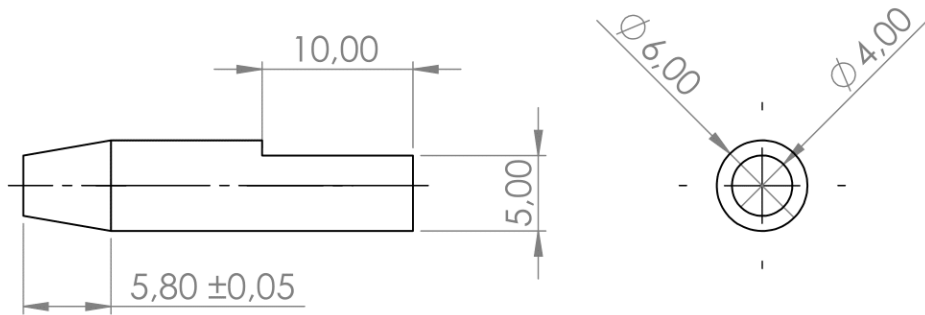
|           |           |          |                    |                                |
|-----------|-----------|----------|--------------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE   |          | Palier roulement Y | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 1:1       | C45       |          |                    |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS   | MUSTAPHA |                    |                                |
| ETUDIANT  | SMALI     | LYES     |                    |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA | MOHAMED  |                    |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI     | DJAMEL   |                    |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL    | HAMID    | QUANTITE: 1        | DATE:22/06/2022                |



Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra\ 3,6}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

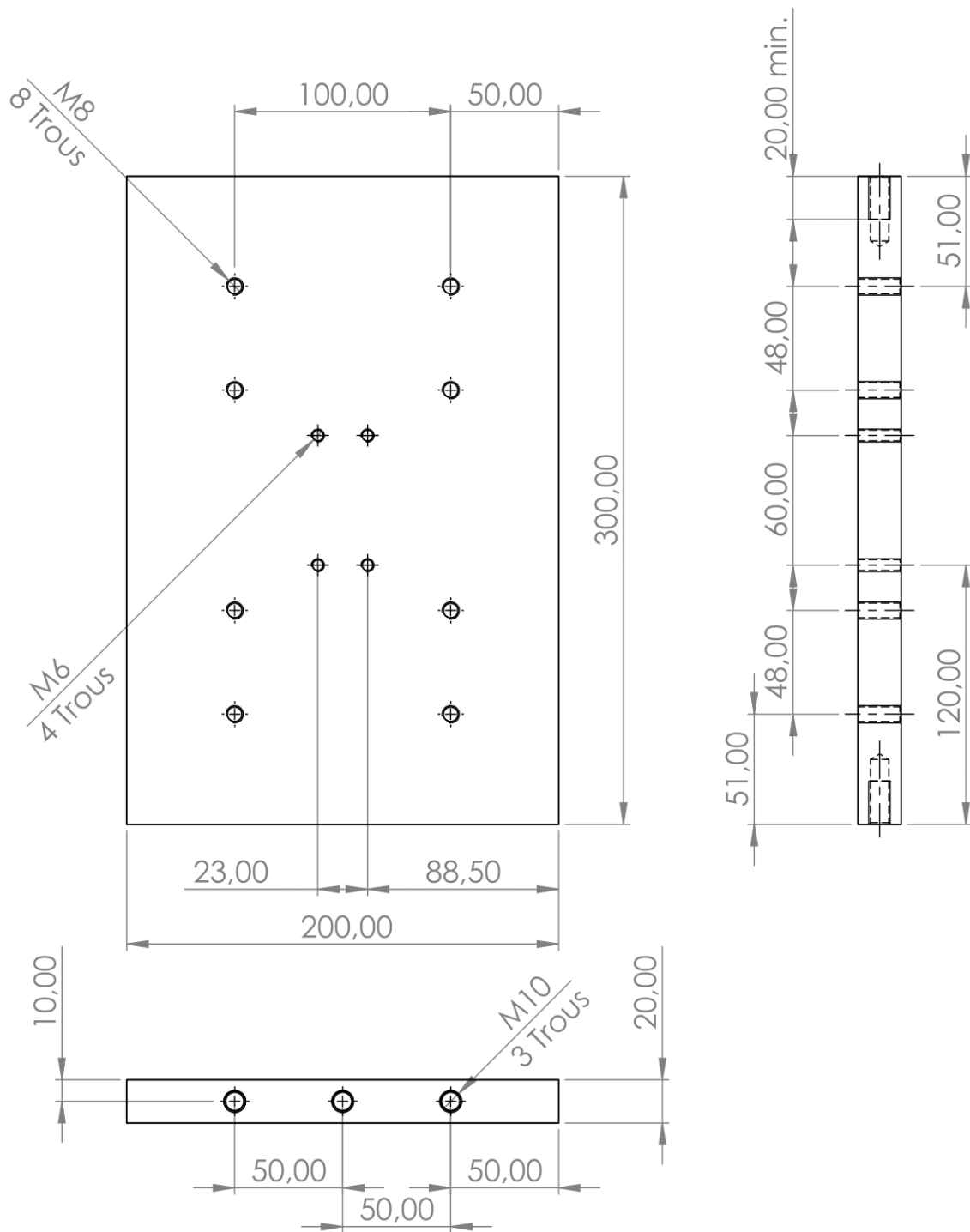
|           |           |          |                    |                                |
|-----------|-----------|----------|--------------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE   |          | Palier-porte-outil | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 1:2       | C45       |          |                    |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS   | MUSTAPHA |                    |                                |
| ETUDIANT  | SMALI     | LYES     | QUANTITE: 1        | DATE:17/06/2022                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA | MOHAMED  |                    |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI     | DJAMEL   |                    |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL    | HAMID    |                    |                                |



Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra\ 3,6}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

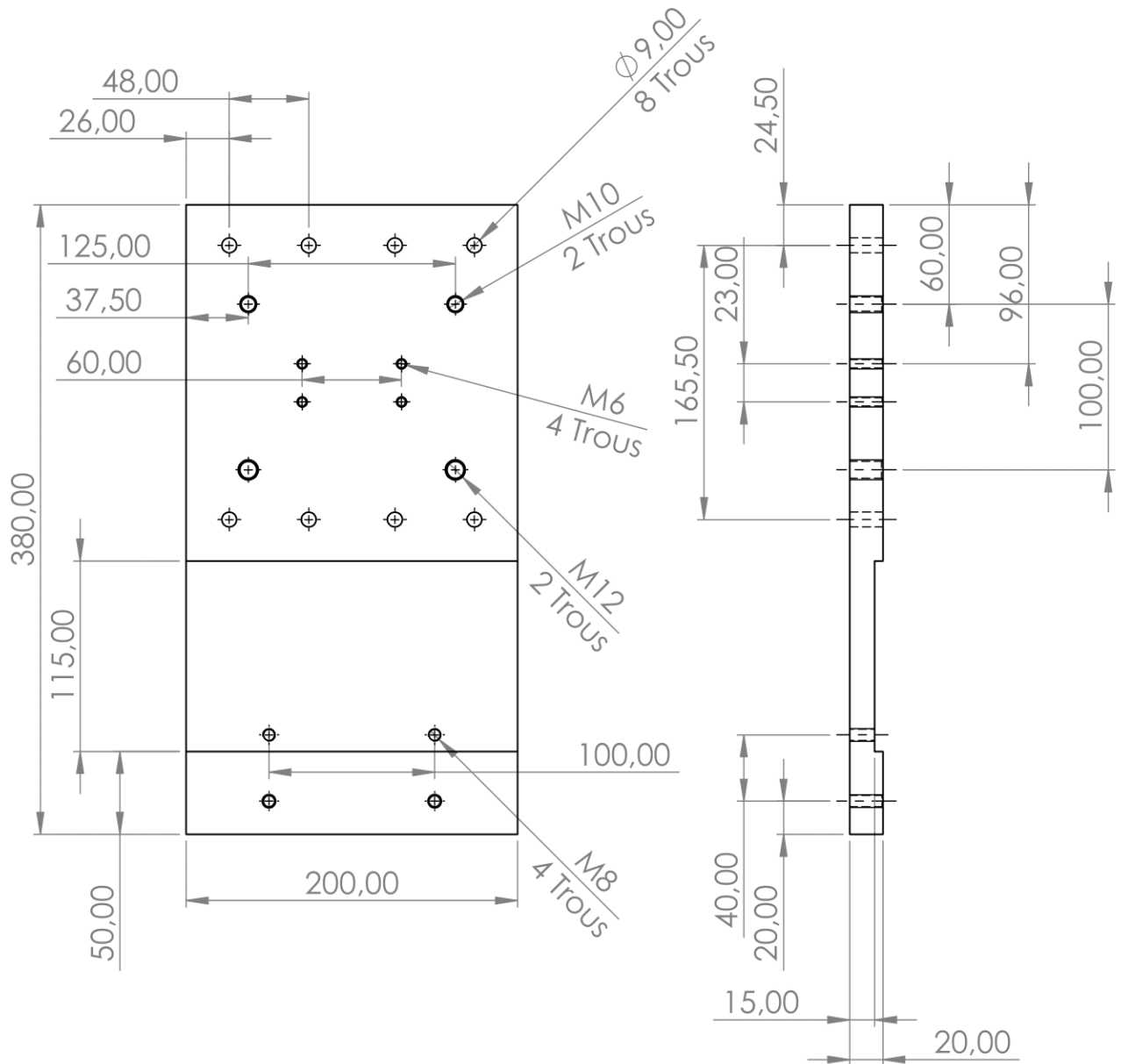
|           |           |          |             |                                |
|-----------|-----------|----------|-------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE   |          | Pion        | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 2:1       | X39CrMoV5 |          |             |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS   | MUSTAPHA |             |                                |
| ETUDIANT  | SMALI     | LYES     |             |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA | MOHAMED  |             |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI     | DJAMEL   | QUANTITE: 1 | DATE: 16/06/2022               |
| PROMOTEUR | SEDJAL    | HAMID    |             |                                |



Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra\ 6,3}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

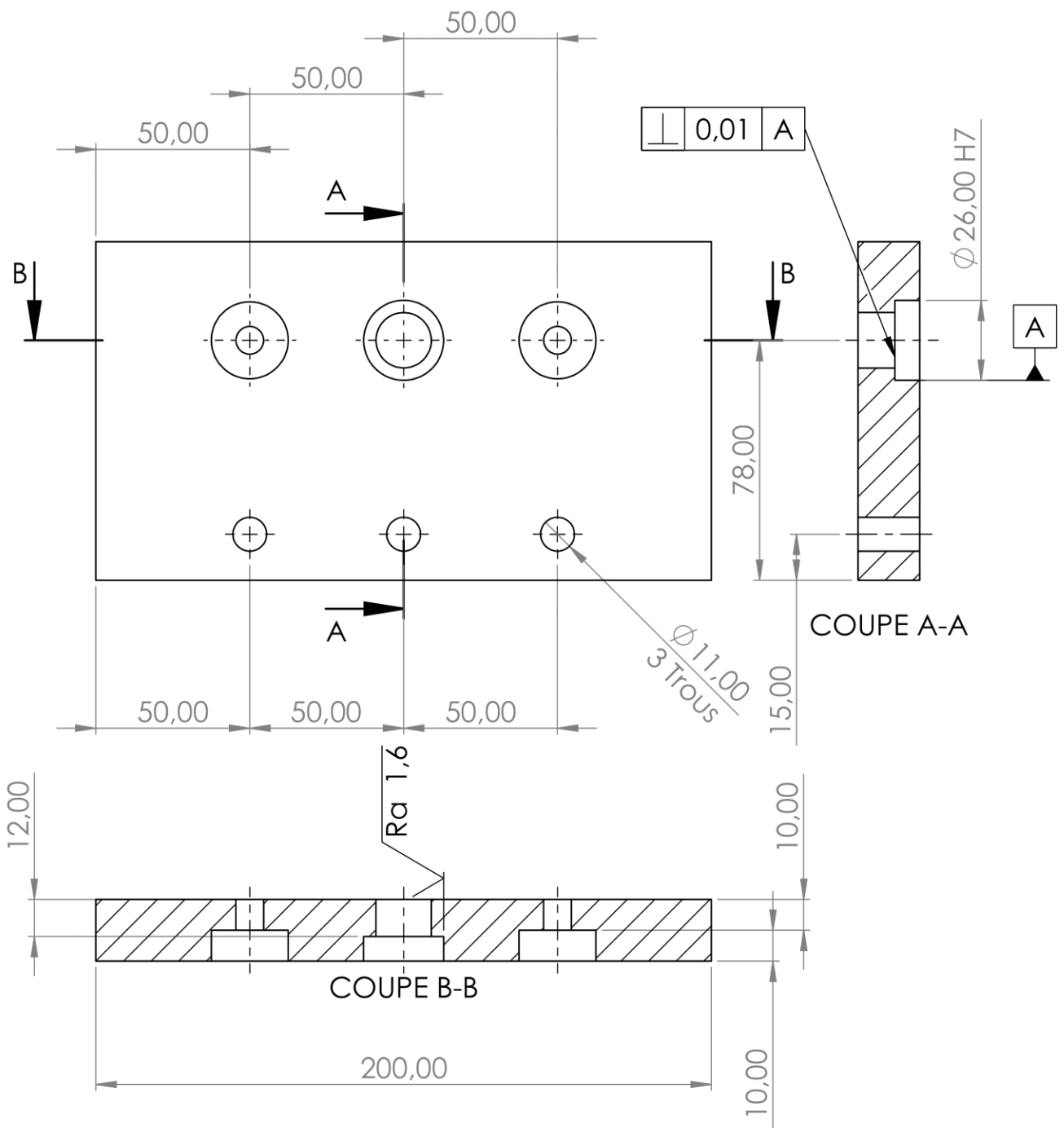
|           |           |          |                |                                |
|-----------|-----------|----------|----------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE   |          | Plaque arrière | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 1:3       | Aluminium |          |                |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS   | MUSTAPHA |                |                                |
| ETUDIANT  | SMALI     | LYES     |                |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA | MOHAMED  |                |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI     | DJAMEL   |                |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL    | HAMID    | QUANTITE: 1    | DATE:23/06/2022                |



Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra\ 6,3}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

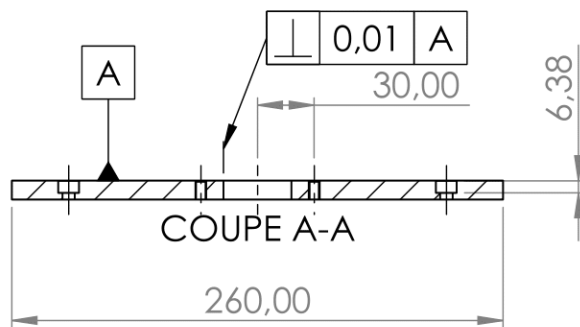
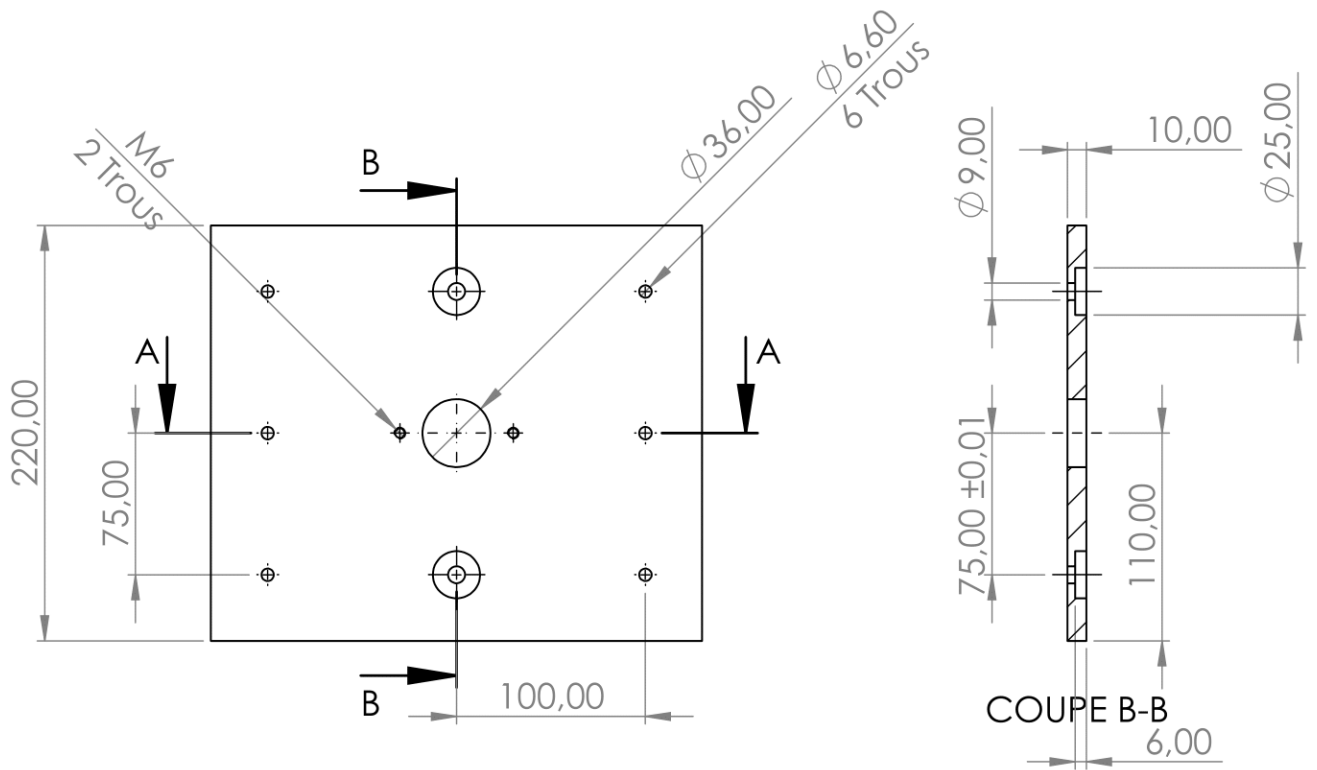
|           |           |          |              |                                |
|-----------|-----------|----------|--------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE   |          | Plaque avant | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 1:4       | Aluminium |          |              |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS   | MUSTAPHA |              |                                |
| ETUDIANT  | SMALI     | LYES     |              |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA | MOHAMED  |              |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI     | DJAMEL   |              |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL    | HAMID    | QUANTITE: 1  | DATE:24/06/2022                |



Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra 6,3}$  Partout sauf indiqué

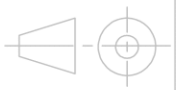
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

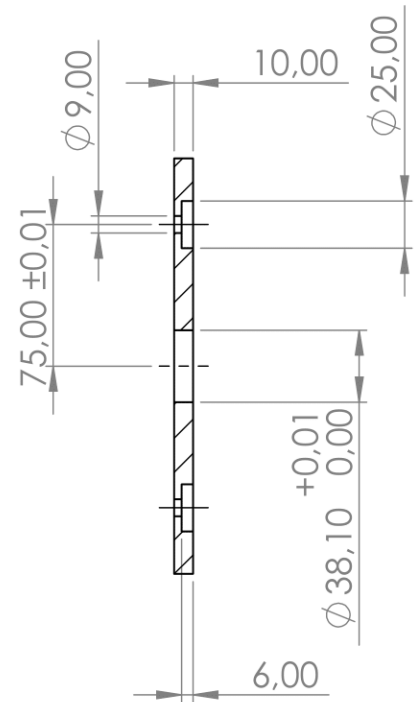
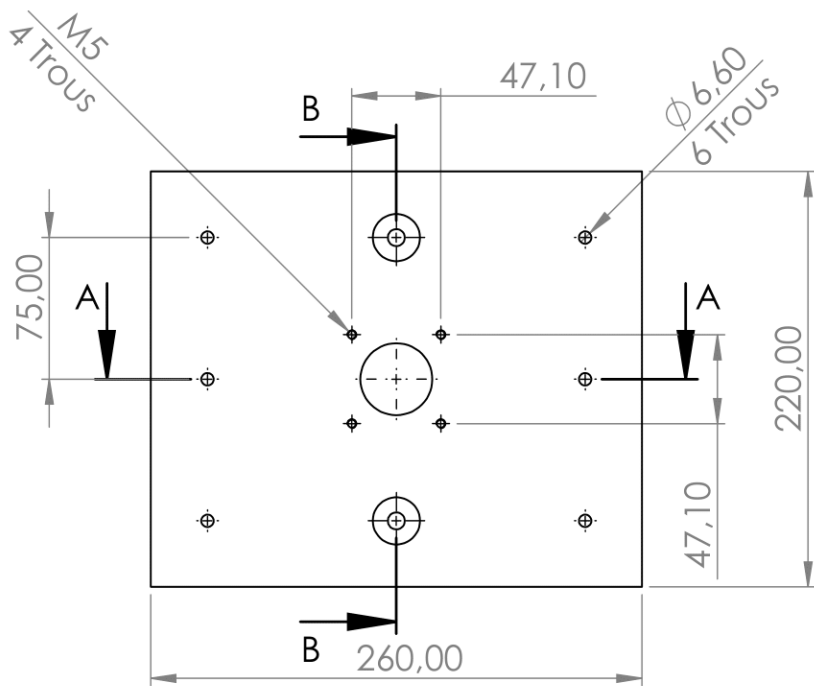
|           |           |          |              |                                |
|-----------|-----------|----------|--------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE   |          | Plaque basse | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 1:2       | Aluminium |          |              |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS   | MUSTAPHA |              |                                |
| ETUDIANT  | SMALI     | LYES     |              |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA | MOHAMED  |              |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI     | DJAMEL   |              |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL    | HAMID    | QUANTITE: 1  | DATE:24/06/2022                |



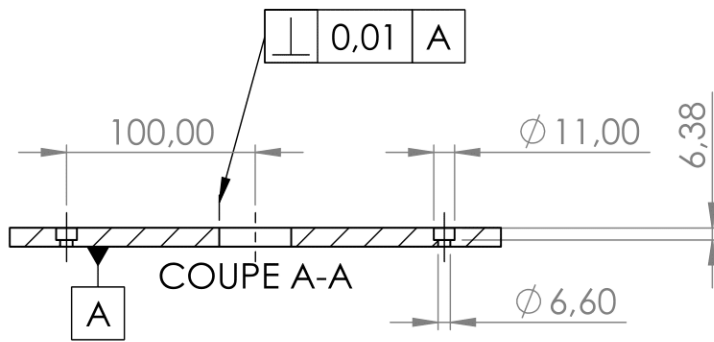
Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra 6,3}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

|           |             |   |                  |                                |
|-----------|-------------|---|------------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE     |  | Plaquette droite | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 1:4       | Acier const |   |                  |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS     | MUSTAPHA  |                  |                                |
| ETUDIANT  | SMALI       | LYES  |                  |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA   | MOHAMED   |                  |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI       | DJAMEL  |                  |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL      | HAMID   | QUANTITE: 1      | DATE:22/06/2022                |



COUPE B-B



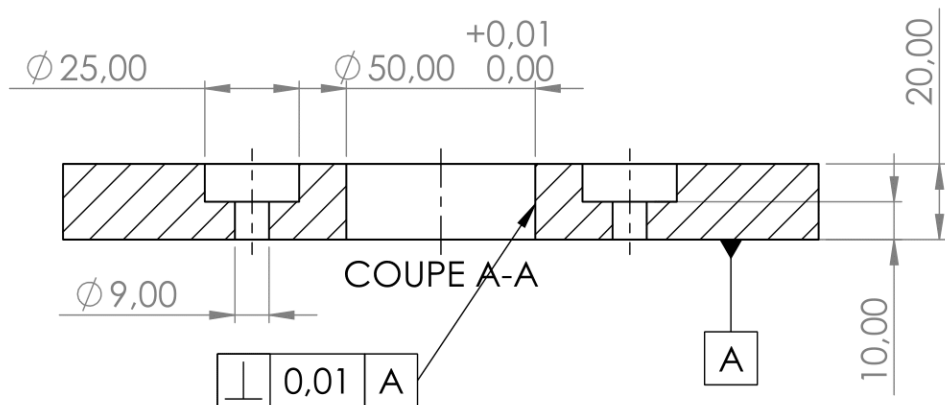
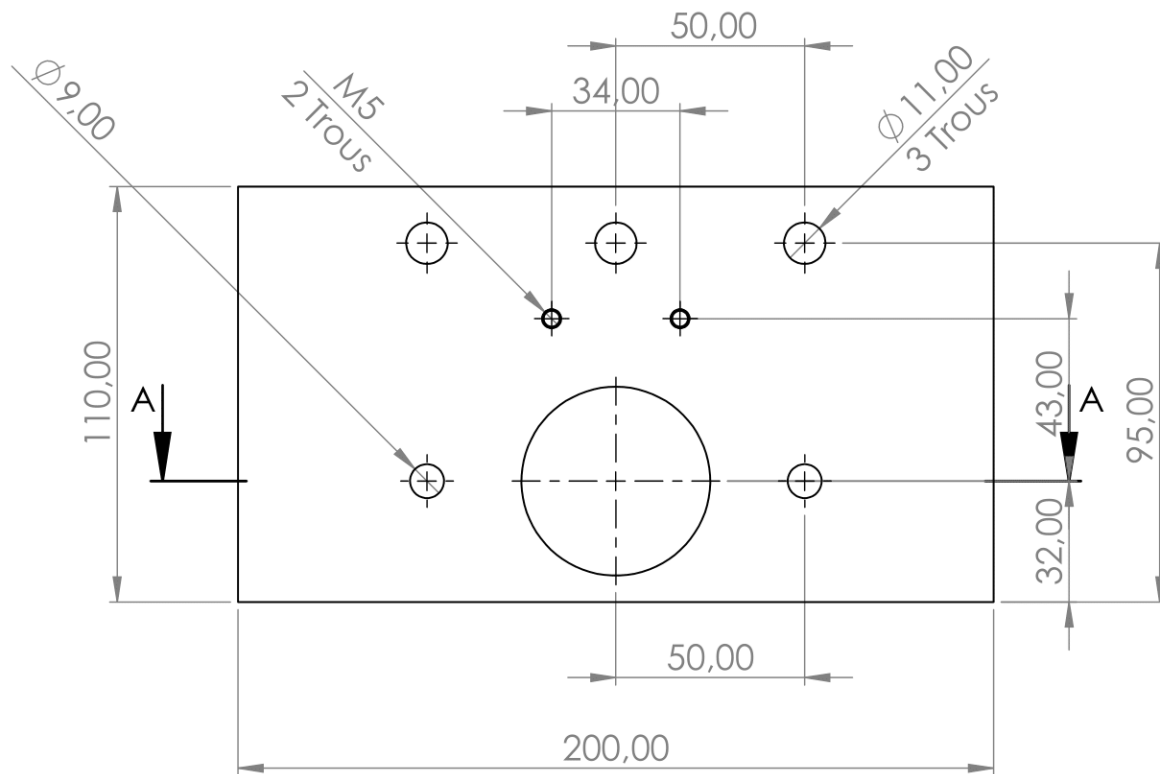
COUPE A-A

Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra\ 6,3}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

|           |             |          |               |                                |
|-----------|-------------|----------|---------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE     |          | Plaque gauche | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 1:4       | Acier const |          |               |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS     | MUSTAPHA |               |                                |
| ETUDIANT  | SMALI       | LYES     |               |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA   | MOHAMED  |               |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI       | DJAMEL   |               |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL      | HAMID    | QUANTITE: 1   | DATE:22/06/2022                |

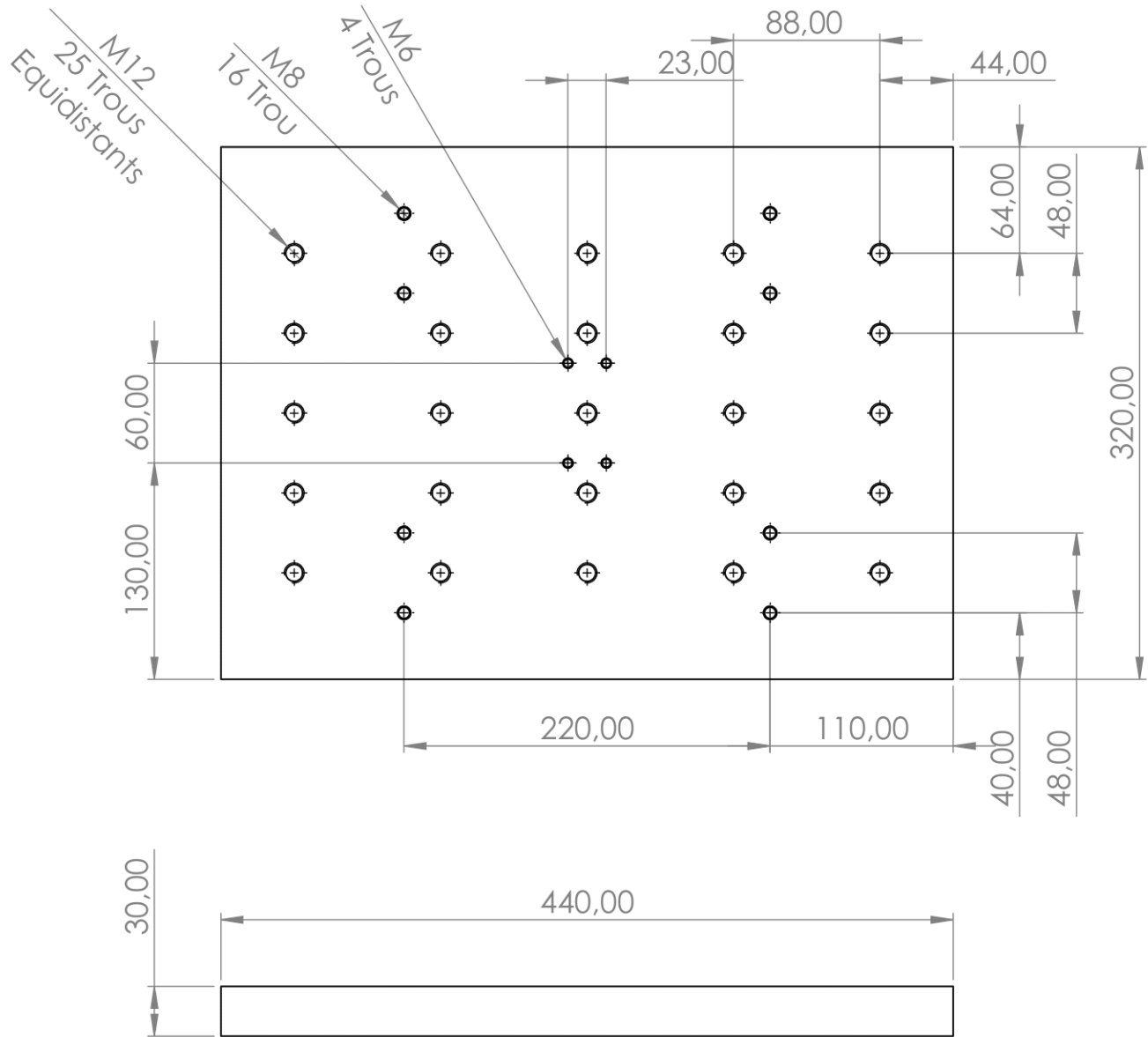




Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra\ 3,6}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

|           |           |          |              |                                |
|-----------|-----------|----------|--------------|--------------------------------|
| ECHELLE   | MATIERE   |          | Plaque haute | DEPARTAMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| 1:2       | Aluminium |          |              |                                |
| ETUDIANT  | KEDDOUS   | MUSTAPHA |              |                                |
| ETUDIANT  | SMALI     | LYES     |              |                                |
| PROMOTEUR | BENBRAIKA | MOHAMED  |              |                                |
| PROMOTEUR | SAIDI     | DJAMEL   |              |                                |
| PROMOTEUR | SEDJAL    | HAMID    | QUANTITE: 1  | DATE:23/06/2022                |



Tolérance  $\pm 0,1$  Etat de surface  $\sqrt{Ra\ 6,3}$  Partout sauf indiqué

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

|                        |                      |             |                  |                                |
|------------------------|----------------------|-------------|------------------|--------------------------------|
| ECHELLE<br>1:4         | MATIERE<br>Aluminium |             | Table de travail | DEPARTEMENT<br>GENIE MECANIQUE |
| ETUDIANT<br>KEDDOUS    | MUSTAPHA             |             |                  |                                |
| ETUDIANT<br>SMAÏLI     | LYES                 |             |                  |                                |
| PROMOTEUR<br>BENBRAÏKA | MOHAMED              | QUANTITE: 1 | DATE:25/06/2022  |                                |
| PROMOTEUR<br>SAÏDI     | DJAMEL               |             |                  |                                |
| PROMOTEUR<br>SEDJAL    | HAMID                |             |                  |                                |