

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
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

**Réalisation d'une mini machine de fatigue automatisée en flexion
plane sur multi éprouvettes**

Réalisé par :

SAADANE Firas Assil
TAHRAOUI Djamel Eddine

Sous la direction de :

M. Yacine Belkacemi M.C.A
M. Brahim Guergueb M.A.A

Présenté et soutenu le 06/07/2022

Composition du jury :

Président	M. RECHAK Said	PROFESSEUR	ENP
Promoteur	M. BELKACEMI Yacine	MC-A	ENP
Promoteur	M. GUERGUEB Brahim	MA-A	ENP
Examineur	M. SAIDI Djamel	MC-B	ENP
Invités	M. ZEHANA Abdelhalim	INGÉNIEUR	USIPRECIS
	M. ALI RACHEDI Slim	PRÉPARATEUR	SIDER

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
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

**Réalisation d'une mini machine de fatigue automatisée en flexion
plane sur multi éprouvettes**

Réalisé par :

SAADANE Firas Assil
TAHRAOUI Djamel Eddine

Sous la direction de :

M. Yacine Belkacemi M.C.A
M. Brahim Guergueb M.A.A

Présenté et soutenu le 06/07/2022

Composition du jury :

Président	M. RECHAK Said	PROFESSEUR	ENP
Promoteur	M. BELKACEMI Yacine	MC-A	ENP
Promoteur	M. GUERGUEB Brahim	MA-A	ENP
Examineur	M. SAIDI Djamel	MC-B	ENP
Invités	M. ZEHANA Abdelhalim	INGÉNIEUR	USIPRECIS
	M. ALI RACHEDI Slim	PRÉPARATEUR	SIDER

ملخص:

الغرض من هذا المشروع هو صناعة آلة أوتوماتيكية قادرة على القيام بتجارب الإجهاد الناتج عن الثني المسطح اعتمادا على التصميم المنفذ سابقا من طرف طالب من دائرة الهندسة الميكانيكية في مشروع تخرجه. هذه الآلة مستوحاة من آلة أخرى صنعت في عام 2013 والتي تقوم بنفس النوع من الاختبارات للعينات ، الآلة هي الإصدار الأمثل لهذا الأخير لكونها تقوم بتوليد ضوضاء واهتزازات أقل. المحرك الذي تم اختياره لإنشاء الحركة اللازمة لتنفيذ الاختبارات هو محرك متدرج. قمنا بتصنيع غالبية أجزاء الماكينة في مجمع الحجار للحديد والصلب في عنابة وقمنا بتصحيحها وتجميعها في USIPRECIS ، الجزائر العاصمة.

كلمات مفتاحية : التعب ، الانحناء ، آلة ، أوتوماتيكية ، محرك متدرج.

Abstract:

This project aims at realizing an automated machine for fatigue tests in plane bending based on the design previously made by a student of our department in his final project. This machine is inspired by another one realized in 2013 allowing to perform the same type of tests for multi-specimen. Nevertheless, our machine is completely automated with a stepper motor. Our machine generates less noise and less vibrations. This motor allows it to be controlled in terms of frequency and amplitude. We have manufactured the majority of the parts of the machine in the steel complex of El Hadjar in Annaba and have corrected and assembled them at USIPRECIS, Algiers.

Keywords: Fatigue, Bending, Machine, Automation, Stepper motor.

Résumé :

Ce projet a pour but de réaliser une machine automatisée pour des essais de fatigue en flexion plane en se basant sur la conception précédemment faite par un étudiant de notre département dans son projet de fin d'études. Cette machine est inspirée d'une machine réalisée en 2013 permettant d'effectuer le même type d'essais pour multi-éprouvette. Néanmoins, notre machine est complètement automatisée grâce à un moteur pas à pas, génère moins de bruit et moins de vibrations. Ce moteur permet d'être contrôlé en termes de fréquence et d'amplitude. Nous avons fabriqué la majorité des pièces de la machine dans le complexe sidérurgique d'El Hadjar à Annaba et les avons corrigées et assemblées chez USIPRECIS, Alger.

Mots clés : Fatigue, Flexion, Machine, Automatisation, Moteur pas à pas.

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de notre projet et qui nous ont aidés dans la rédaction de ce mémoire.

Nous tenons, tout d'abord, à remercier nos encadrants, M. BELKACEMI et M. GUERGUEB, pour leur patience, leur disponibilité et surtout leurs conseils judicieux, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

Nous tenons également à remercier les membres du jury, le président M. RECHAK Said et l'examineur M. SAIDI Djamel, nous espérons que vous apprécierez ce travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude pour toutes les personnes qui nous ont aidés dans la réalisation de ce projet, un remerciement spécial à M. BOUSSOUSSOU et M. CHALAL qui ont contribué dans la partie automatique de ce projet et qui nous ont beaucoup appris sur les défis à relever dans un domaine peu connu par nous. Ils ont partagé leurs connaissances et leur expérience dans ce domaine, tout en nous accordant leur confiance et une grande indépendance dans l'exécution de tâches gratifiantes.

Le Complexe sidérurgique d'El Hadjar et l'équipe de l'AMM, pour avoir accepté de nous aider lors de la réalisation des pièces nécessaires à notre projet, à M. ALI RACHEDI Slim, l'un des préparateurs de l'AMM qui a agi non seulement comme un tuteur, mais aussi comme un père en nous apprenant la manière de se comporter dans le milieu professionnel.

M. ZEHANA Halim, Pour son infinie générosité et son aide à corriger les multiples erreurs que nous avons rencontrées au cours de notre projet, et pour la qualité enrichissante des connaissances qu'il nous a transmises.

Mme YOUSFI Manel et Mme MECHTI Ines, pour leur contribution pendant la période de ce projet, et pour les conseils qu'elles nous ont donnés.

Nous tenons à remercier tout particulièrement nos parents et nos frères et sœurs pour tout ce qu'ils ont fait afin de nous amener à ce stade, leur aide, leur soutien et leurs encouragements ont été la principale cause qui nous a poussés à donner le meilleur de nous-mêmes.

Ce travail est à la mémoire du défunt père de M. TAHRAOUI Djamel Eddine, un père exceptionnel.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES SYMBOLES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	12
CHAPITRE I	14
I-1 INTRODUCTION	15
I-2 HISTORIQUE	15
I-3 LE PHÉNOMÈNE DE LA FATIGUE	16
I-4 LE PROCESSUS DE LA FATIGUE	17
4.1 Initiation des fissures	17
4.2 Propagation des fissures et rupture	17
I-5 LES ESSAIS DE FATIGUE	18
5.1 Contraintes Appliquées	18
5.2 Cycle de contrainte en fatigue	19
5.3 Courbe S-N (Courbe d'endurance)	20
5.4 Limite d'endurance	22
5.5 Classification des machines d'essai de fatigue	22
5.5.1 Machine d'essai de fatigue axiale (contrainte directe)	22
5.5.2 Machines d'essais de fatigue par flexion	25
5.5.2.a Machines d'essais de fatigue par flexion plane	25
5.5.2.b Machines à faisceau rotatif	25
5.5.3 Machines d'essai de fatigue en torsion	25
5.6 Éprouvettes d'essai de fatigue	26
I-6 CONCLUSION	27
CHAPITRE II	28
II-1 INTRODUCTION	29
II-2 LA MACHINE À RÉALISER	29
II-3 LES OPÉRATIONS DE CORRECTION	31
3.1 Avant la fabrication des pièces	31
3.2 Après le contrôle des pièces usinées et l'essai de montage	32
3.2.1 Ajustage des tiges de guidage	32
3.2.2 Refaire les taraudages	32
3.2.3 Entretoises et système de guidage	32
3.2.4 Problème d'arc-boutement dans le système de guidage	33
3.2.5 Problème d'effort de la vis à billes sur le roulement et la plaque de fixation	34
II-4 CONCLUSION	35
CHAPITRE III	36
III-1 INTRODUCTION	37
III-2 PRÉSENTATION DE NOTRE MACHINE	37
III-3 LES REPÈRES CONSTITUTIFS DE LA MACHINE	38

3.1 Les organes usinés	38
3.2 Les organes achetés	38
III-4 ÉTAT DES LIEUX (PRÉSENTATION DES AMM)	39
III-5 MATÉRIAU UTILISÉ POUR LA FABRICATION DES PIÈCES	40
III-6 PROCÉDURE D'USINAGE DES PIÈCES	41
6.1 FRAISAGE	42
6.1.1 L'étau et sa face	42
6.1.2 Les plaques de guidage	42
6.1.3 Les plaques de fixation	44
6.1.4 La base	45
6.1.5 Les nervures	46
6.1.6 Les cales	47
6.2 TOURNAGE	48
6.2.1 Les tiges de guidage	48
6.2.2 L'entretoise	49
6.2.3 Les entretoises de guidage	49
6.2.4 Les bagues en bronze	50
III-7 PIÈCES ACHETÉES	51
7.1 Butée à billes	51
7.2 Accouplement élastique	51
7.3 La vis à billes	53
III-8 CONCLUSION	54
CHAPITRE IV	55
IV-1 INTRODUCTION	56
IV-2 PROCÉDURE DE MONTAGE ET PRÉCAUTIONS	56
2.1 Montage des étaux et leur face avec la base	56
2.2 Montage de la première plaque de fixation avec la base	56
2.3 Montage des nervures sur la première plaque de fixation	57
2.4 Montage du moteur	57
2.5 Montage des tiges de guidage sur la plaque de fixation	58
2.6 Montage de l'accouplement avec le moteur	58
2.7 Fixation et montage du système de guidage	59
2.8 Montage de la vis sans fin sur la bague à billes et montage du système de guidage	60
2.9 Montage de la deuxième plaque de fixation	60
2.10 Montage des éprouvettes d'essais	61
IV-3 ÉTUDE DE COÛT DE LA MACHINE	61
IV-4- CONCLUSION	63
CHAPITRE V	64
V-1 INTRODUCTION	65
V-2 L'AUTOMATISATION DE LA MACHINE	65
2.1 Le moteur pas-à-pas	65
2.2 Le matériel utilisé pour le contrôle	67

2.2.1 Le driver du moteur	67
2.2.2 Le microcontrôleur ARDUINO	68
2.2.3 Transformateur électrique	68
2.2.4 Le redresseur	69
2.2.5 Afficheur LCD	69
2.2.6 Potentiomètre	70
2.2.7 Bouton poussoir (BP)	70
V-3 Le schéma électrique	71
V-4 LE DÉMARRAGE ET LA VALIDATION DE LA MACHINE	72
V-5 CONCLUSION	73
CONCLUSION GÉNÉRALE	75
BIBLIOGRAPHIE	78
ANNEXES	80

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : L'initiation d'une fissure	16
Figure 1.2 : Fatigue dans un essieu de wagon	17
Figure 1.3 : Modèle d'intrusion-extrusion de l'initiation des fissures de fatigue	17
Figure 1.4 : Vue microscopique d'une surface de rupture par fatigue	18
Figure 1.5 : Faciès de rupture de fatigue	18
Figure 1.6 : Les contraintes maximale, globale et nominale	19
Figure 1.7 : Divers types de sollicitations sinusoïdales	19
Figure 1.8 : Courbes S - N pour l'aluminium et l'acier à faible teneur en carbone	20
Figure 1.9 : La courbe de Wöhler	21
Figure 1.10-a : Machine d'essai servo-hydraulique HB	23
Figure 1.10-b Vibrophore	24
Figure 1.10-c : Machine d'essais de fatigue des matériaux et structures de stent sur une série d'échantillons	24
Figure 1.11 : Schéma des machines d'essai de fatigue à poutre rotative	25
Figure 1.12 : Éprouvettes d'essai de fatigue typiques -1-	26
Figure 1.13 : Éprouvettes d'essai de fatigue typiques -2-	27
Figure 2.1 : La machine conçue en 2013 au département de L'ENP d'Alger	29
Figure 2.2 : les pièces constituant la machine	30
Figure 2.3 : Système de guidage après la première rectification	33
Figure 2.4 : Phénomène d'arc-boutement	34
Figure 2.5 : Le système de guidage après la deuxième rectification	34
Figure 2.6 : système de transmission de mouvement après la rectification	35
Figure 3.1 : Les pièces constituant la machine réalisée	37
Figure 3.2 : Découpage Zonal des AMM	40
Figure 3.3 : Dessin de définition de l'entretoise de guidage	50
Figure 3.4 : Plan des bagues en bronze	50
Figure 3.5 : Butée à billes	51
Figure 3.6 : Pièces d'accouplement élastique	52
Figure 3.7 : La conception de deux parties d'accouplement à l'aide de Solidworks	52
Figure 3.8 : Le plan des deux parties de l'accouplement	53
Figure 3.9 : Image descriptive du principe de fonctionnement d'une vis à billes avec noix à bille	53

Figure 3.10 : écrou à vis à billes.	54
Figure 4.1 : Première étape de l'assemblage	56
Figure 4.2 : Deuxième étape de l'assemblage	57
Figure 4.3 : Troisième étape de l'assemblage	57
Figure 4.4 : Quatrième étape de l'assemblage	58
Figure 4.5 : Cinquième étape de l'assemblage	58
Figure 4.6 : Sixième étape de l'assemblage	59
Figure 4.7 : Septième étape de l'assemblage	59
Figure 4.8 : Huitième étape de l'assemblage	60
Figure 4.9 : Assemblage Final de la machine sur SOLIDWORKS	61
Figure 5.1 : Le moteur pas à pas utilisé	65
Figure 5.2 : Les dimensions de notre moteur pas à pas	66
Figure 5.3 : Courbes de vitesse et de couple pour notre moteur pas à pas	67
Figure 5.4 : Driver du moteur pas à pas	67
Figure 5.5 : Microcontrôleur Arduino	68
Figure 5.6 : Transformateur châssis ouvert 9va 2 x 9v 500ma	69
Figure 5.7 : Circuit redresseur	69
Figure 5.8 : Afficheur LCD 16X2	70
Figure 5.9 : Un potentiomètre rotatif standard	70
Figure 5.10 : Bouton poussoir pour l'Arduino	71
Figure 5.11 : Le schéma électrique du montage	71
Figure 5.12 : Photos réelles de la machine après les premiers tests	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Les éléments de la machine	31
Tableau 3.1 : Les pièces usinées	38
Tableau 3.2 : Les organes achetés	38
Tableau 3.3 : Analyse caractéristique de l'acier XC48	41
Tableau 3.4 : Classification des pièces par procédé de fraisage ou tournage	41
Tableau 3.5 : Gamme d'usinage de la face de l'étau	42
Tableau 3.6 : Gamme d'usinage de la première plaque de guidage	43
Tableau 3.7 : Gamme d'usinage de la deuxième plaque de guidage	44
Tableau 3.8 : Gamme d'usinage des plaques de fixation	45
Tableau 3.9 : Gamme d'usinage de la base	46
Tableau 3.10 : Gamme d'usinage des nervures	47
Tableau 3.11 : Gamme d'usinage des cales	48
Tableau 3.12 : Gamme d'usinage des tiges de guidage	49
Tableau 4.1 : Coût total des pièces usinées	62
Tableau 4.2 : Coût total des pièces achetées	62

LISTE DES SYMBOLES

σ_{max} : Contrainte maximale

σ_{min} : Contrainte minimale

σ_m : Contrainte moyenne

σ_e : La limite d'élasticité

σ_a : L'amplitude de la contrainte

$\Delta\sigma$: Étendu de la variation de la contrainte

R : Le rapport de charge

N : Le nombre de cycles

R_m : Résistance à la traction

A% : Pourcentage de l'allongement

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE :

Un grand nombre d'accidents catastrophiques dans l'aviation, les chemins de fer et l'industrie en général est causé par la fissuration et la défaillance des pièces mécaniques. L'une des principales causes d'initiation des fissures est la fatigue des matériaux et des structures. C'est la raison pour laquelle la communauté scientifique s'est concentrée sur ce mode d'endommagement.

La fatigue est l'initiation et la propagation de fissures dans un matériau en raison d'une charge cyclique. Une fois qu'une fissure de fatigue est apparue, elle s'agrandit petit à petit à chaque cycle de chargement, produisant généralement des stries sur certaines parties de la surface de rupture. La fissure continue à se développer jusqu'à ce qu'elle atteigne une taille critique, produisant une propagation rapide et généralement la rupture complète de la structure. Dans cette partie, nous allons parler des accidents causés par la fatigue des matériaux.

En 1842, à Versailles, des centaines de personnes s'entassaient dans d'innombrables wagons de train, si nombreux qu'il a fallu deux locomotives pour les tirer. Alors que le train se dirigeait de Versailles vers Paris, la locomotive principale a cassé un essieu, ce qui l'a fait dérailler. Des réactions en chaîne ont vu de nombreux wagons du train s'empiler les uns sur les autres et prendre feu, en raison de la dispersion des boîtes à feu des locomotives. Selon la plupart des estimations, l'accident et l'incendie qui a suivi ont fait entre 52 et 200 morts. L'accident s'est également produit à une époque où la fatigue du métal au fil du temps n'était pas bien comprise, ce qui a suscité la peur et la confusion au sein de la population. [1]

En janvier 1954, le vol 781 de la BOAC, en direction de Londres depuis Rome, a subi une décompression explosive au-dessus de la mer Méditerranéenne où les 35 passagers et membres de l'équipage sont décédés. Quelques semaines seulement après avoir été autorisé à voler, un autre avion Comet, le vol 201 de South African Airways, a subi une décompression explosive au-dessus de la Méditerranée alors qu'il se dirigeait de Rome vers Johannesburg. Là encore, les 21 passagers et membres d'équipage sont décédés. Après une enquête approfondie de plusieurs années sur les deux vols, il a été déterminé que la fatigue du métal causée par des défauts de conception a conduit à la décompression explosive dans les deux cas.[1]

Ces accidents horribles et bien d'autres ont incité les ingénieurs à développer de nouveaux tests pour comprendre le phénomène de la fatigue afin de minimiser ses effets dangereux.

Le département génie mécanique s'inscrit dans une démarche de développement de machine d'essais à moindres coûts et les utilise comme bancs d'essais pédagogiques et recherche. Notre objectif est de réaliser une nouvelle machine d'essai de fatigue en flexion plane inspirée d'une machine fabriquée par des élèves ingénieurs en génie mécanique en 2013.[2]

Notre travail est la continuité du travail de M. BOUARADA [3] dans son projet de fin d'études. Nous avons réussi à fabriquer une machine qui effectue les mêmes tests que l'ancienne machine pour le même nombre d'éprouvettes, mais avec une conception plus simple, plus légère, générant moins de bruit et de vibrations, avec moins de pièces mécaniques et donnant une meilleure précision et automatisée. Cette machine utilise un moteur pas à pas au lieu d'un moteur asynchrone.

Pour fabriquer cette machine, nous nous sommes rendus au complexe sidérurgique d'El-Hadjar à Annaba, où nous avons discuté avec les responsables de l'entreprise et plus particulièrement avec M. MADANI, le directeur des Ateliers Maghrébins de Mécanique (AMM), de la possibilité de réaliser les pièces mécaniques au sein de leurs ateliers. Après négociation, nous avons pu les convaincre de passer un accord avec notre département et de nous permettre de fabriquer toutes les pièces mécaniques usinables au sein de leur entreprise gratuitement. Un soutien complémentaire est venu de la part de M. Zehana, gérant de la Sarl USIPRECIS pour apporter plusieurs corrections de conception et de réalisation de pièces dans son atelier.

Ce document, après une introduction générale, est composé de cinq chapitres.

Le premier chapitre présente les définitions du phénomène de la fatigue en général et des essais de fatigue en particulier.

Le chapitre 2 est consacré à la présentation de la machine qui nous a inspiré et celle conçue par Monsieur BOUARADA. Notre but est de la réaliser, en expliquant les opérations de correction avant et après la fabrication des pièces qui la constituent.

Les éléments de la structure finale de la machine et l'explication de la procédure de fabrication de chaque pièce de la machine sont présentés dans le chapitre 3.

Le chapitre 4 donne les explications de la procédure d'assemblage des pièces de la machine avec une estimation du coût total de réalisation.

Le chapitre 5 est consacré à la procédure d'automatisation de la machine et ses performances.

Le mémoire se termine par une conclusion générale.

CHAPITRE I

INTRODUCTION À LA FATIGUE ET AUX ESSAIS DE FATIGUE

I-1 INTRODUCTION

Nous avons tous essayé, surtout quand nous étions enfants, de couper un fil d'acier à mains nues et sans outils. La technique était très simple, elle consistait à appliquer une charge cyclique sur une partie de ce fil en le pliant dans un sens et dans l'autre, de manière répétée, jusqu'à ce qu'il soit coupé. Ce que nous ne savions pas, c'est qu'un phénomène très connu en science des matériaux était présent, et c'est ce qui nous a permis de couper notre fil, ce phénomène est appelé "la fatigue des matériaux et des structures".

Ce phénomène est particulièrement dangereux, car il se produit progressivement au fil du temps et sans créer de modifications visibles sur les pièces et les structures, ainsi que dans des endroits souvent difficiles d'accès, mais particulièrement exposés à ces dommages en raison de leur forme.

Dans ce chapitre, nous allons étudier ce phénomène et le comprendre pour en déduire le comportement des matériaux soumis à ce type de chargement.

I-2 HISTORIQUE :

Depuis la première moitié du XIXe siècle, on a remarqué que des défaillances mécaniques se produisaient dans les métaux et les matériaux exposés à des contraintes répétitives bien inférieures à leur limite élastique. Le matériau s'endommage et nous utilisons le terme "fatigue du métal ou des matériaux".

Dans cette section, nous présenterons la contribution de certains ingénieurs et chercheurs qui ont marqué l'histoire de la fatigue en introduisant ce phénomène au monde et en lançant des études qui nous ont permis d'en savoir plus et de comprendre ce mode de dommage pour éviter de nombreuses catastrophes et protéger les personnes et les biens.

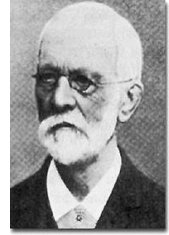
En 1829, Wilhelm August Julius Albert, un directeur de mine allemand, a commencé à observer, examiner et écrire sur la défaillance des câbles de levage des mines due aux petites forces répétées, d'où le premier témoignage connu de la fatigue des métaux. Il a également mis au point une machine d'essai pour les chaînes de convoyeurs miniers.[4]



Au début des années 1840, William John Macquorn Rankine a étudié de nombreux essieux ferroviaires cassés et a découvert que les essieux s'étaient fracturés en raison de la lente croissance d'une fissure fragile à partir d'un épaulement ou d'une concentration de contraintes sur l'arbre. Il a fait part de ses conclusions dans un article publié dans l'Institution of Civil Engineers.[4]



August Wöhler était un ingénieur allemand, il est surtout connu pour ses travaux fondamentaux sur l'étude de la fatigue des matériaux. Ses travaux sont les premiers à caractériser systématiquement le comportement en fatigue des matériaux à l'aide de courbes S-N ou de courbes de Wöhler. Il conçoit une machine pour le chargement répétitif d'essieux de train et montre clairement que la rupture par fatigue se produit par la croissance des fissures à partir des défauts de surface jusqu'à ce que la charge ne puisse plus être soutenue.[4]



I-3 LE PHÉNOMÈNE DE LA FATIGUE :

La fatigue peut être définie comme le processus de changement structurel, permanent, localisé et progressif qui se manifeste dans un matériau soumis à des conditions qui génèrent des contraintes et des déformations fluctuantes en certains points (organes en rotation, vibrations, rafales de vent, etc.) et qui peuvent entraîner des fissures ou une défaillance complète après un nombre suffisant de cycles.

L'image suivante montre le début du processus de fatigue dans une structure soumise à une charge cyclique.

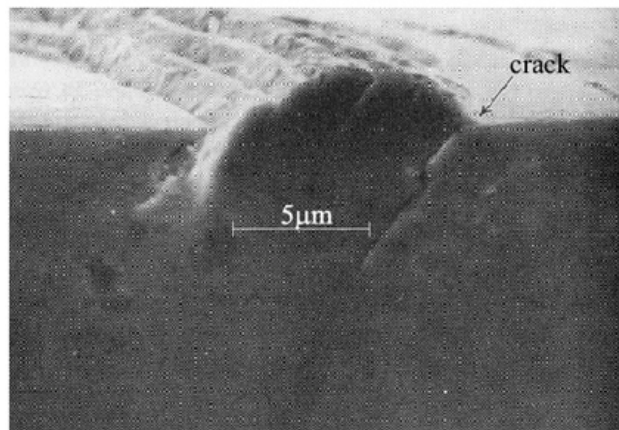


Figure 1.1 : L'initiation d'une fissure.[5]

L'étude moderne de la fatigue est généralement datée des travaux de A. Wohler qui était préoccupé par la défaillance des essieux après diverses périodes de service, à des charges considérablement inférieures à celles prévues. Un essieu de wagon est essentiellement une poutre ronde soumise à une flexion en quatre points, qui produit une contrainte de compression le long de la surface supérieure et une contrainte de traction le long de la surface inférieure (voir la Figure 1.2). Après que l'essieu a fait un demi-tour, le bas devient le haut et vice versa, de sorte que les contraintes sur une région particulière du matériau à la surface varient de façon sinusoïdale de la tension à la compression et vice versa. Ce phénomène est désormais connu sous le nom de chargement de fatigue entièrement inversé, et c'est ce qui a causé l'horrible accident du train à Versailles en 1842.

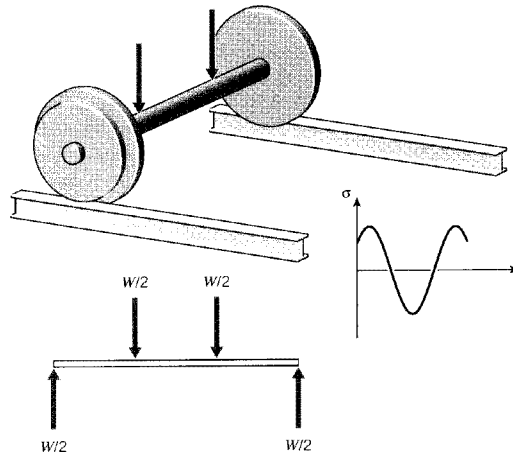


Figure 1.2 : Fatigue dans un essieu de wagon.[6]

I-4 LE PROCESSUS DE LA FATIGUE :

Le processus de la fatigue des matériaux et des structures peut être généralement divisé en deux phases :

4.1 Initiation des fissures :

Selon une vision populaire de la fatigue des matériaux, le processus de fatigue commence à un défaut interne ou superficiel où les contraintes sont concentrées et consistent initialement, un flux de cisaillement le long des plans de glissement. Après un certain nombre de cycles, ce glissement génère des intrusions et des extrusions qui commencent à ressembler à une fissure. Une véritable fissure partant d'une région d'intrusion vers l'intérieur peut se propager initialement le long de l'un des plans de glissement d'origine, mais finit par se propager transversalement à la contrainte normale principale, comme le montre la figure suivante :

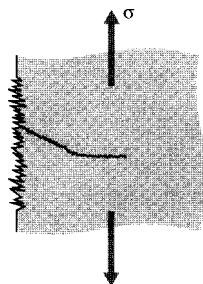


Figure 1.3 : Modèle d'intrusion-extrusion de l'initiation des fissures de fatigue.[5]

4.2 Propagation des fissures et rupture :

Lorsque la surface de rupture d'une éprouvette soumise à la fatigue est examinée, une zone de croissance lente de la fissure est généralement évidente sous forme d'une "coquille" concentrique autour de l'emplacement du défaut initial (la partie noire dans la Figure 1.5). La région de la coquille contient souvent des "beach marks" concentriques au niveau desquelles

la fissure a été arrêtée pendant un certain nombre de cycles avant de reprendre sa croissance. Finalement, la fissure peut devenir suffisamment grande pour satisfaire les critères d'énergie ou d'intensité de la contrainte pour une propagation rapide, selon les expressions précédentes de la mécanique de la rupture.

Cette phase finale produit la surface rugueuse typique d'une fracture rapide. Dans l'examen des pièces défaillantes, il est souvent possible de relier les "beach marks" à des cas spécifiques de surcharge, et d'estimer la contrainte appliquée à la rupture à partir de la taille de la fissure juste avant sa propagation rapide et de la résistance à la rupture du matériau.



Figure 1.4 : Vue microscopique d'une surface.[6]



Figure 1.5 : Faciès de rupture de fatigue.[7]

I-5 LES ESSAIS DE FATIGUE :

Les essais de fatigue sont une forme particulière d'essais mécaniques réalisés en appliquant une charge cyclique à une éprouvette. Ces essais sont utilisés pour déterminer le comportement mécanique d'une pièce lorsqu'elle est soumise à des cycles de contraintes répétitifs, pour connaître sa durée de vie, identifier les zones sensibles afin d'augmenter la sécurité et la stabilité d'une structure susceptible d'être soumise à la fatigue, ce qui permet d'élaborer un programme de maintenance préventive adapté et d'optimiser la conception de la pièce pour améliorer sa robustesse et sa fiabilité.[7]

5.1 Contraintes Appliquées :

Pour les essais de fatigue, la charge appliquée, quasi sinusoïdale, varie en fonction du temps, en raison des seules possibilités de fonctionnement des machines ou pour des raisons de commodité dans le traitement des résultats.

La contrainte prise en compte lors d'un essai de fatigue est la contrainte globale qui est déterminée par rapport à la section de la pièce en fonction de la résistance du matériau et par rapport au domaine élastique. Elle est exprimée en N/mm^2 ou en MPa.

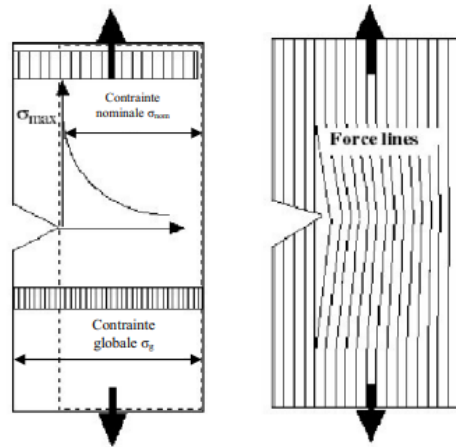


Figure 1.6 : Les contraintes maximale, globale et nominale.[8]

5.2 Cycle de contrainte en fatigue :

Les essais de fatigue sont de types :

- Traction – compression
- Flexion plane
- Flexion rotative
- Flexion trois et quatre points
- Torsion

Les spécimens sont soumis à des contraintes cycliques. La contrainte varie entre un maximum σ_{max} et un minimum σ_{min} .

Le cycle de contrainte de fatigue est représenté par la courbe cyclique suivante :

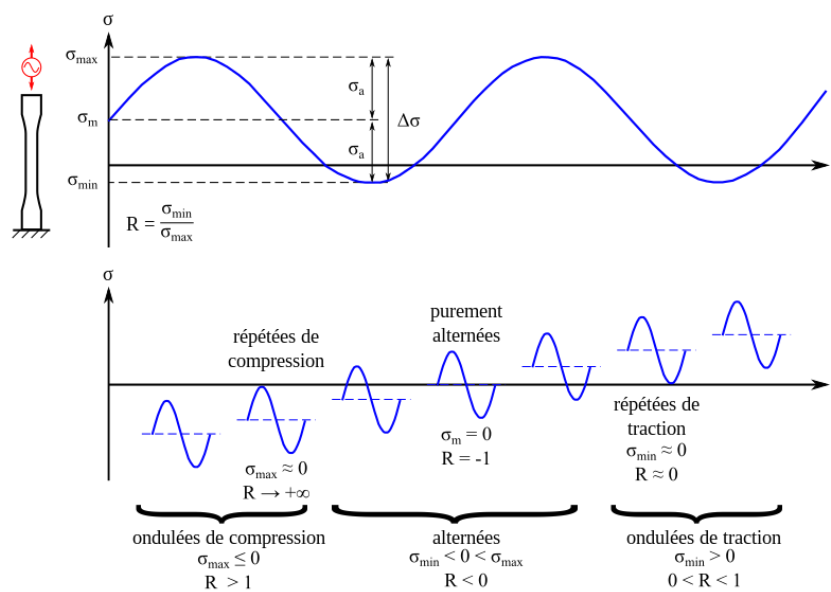


Figure 1.7 : Divers types de sollicitations sinusoïdales.[9]

On distingue :

- La contrainte moyenne : $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$
- L'amplitude de contrainte : $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$
- L'étendue de variation de contrainte : $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a$
- Le rapport de charge R qui est le rapport de la contrainte minimale sur la contrainte maximale : $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$

5.3 Courbe S-N (Courbe d'endurance) :

Bien avant que la compréhension microstructurale des processus de fatigue ne soit développée, les ingénieurs avaient mis au point des moyens empiriques de quantifier le processus de fatigue et de le concevoir. Le concept le plus significatif est sans doute le diagramme S-N, généralement connu sous le nom de "courbe de Wöhler", qui est le seul à permettre la caractérisation des performances d'une pièce ou d'un matériau dans le domaine de la fatigue, comme le montre la figure suivante. Dans laquelle une contrainte cyclique d'amplitude constante S est appliquée à une éprouvette et le nombre de cycles de chargement N jusqu'à la rupture de l'éprouvette est déterminé. Des millions de cycles peuvent être nécessaires pour provoquer la rupture à des niveaux de chargement inférieurs, c'est pourquoi l'abscisse est généralement tracée de manière logarithmique.

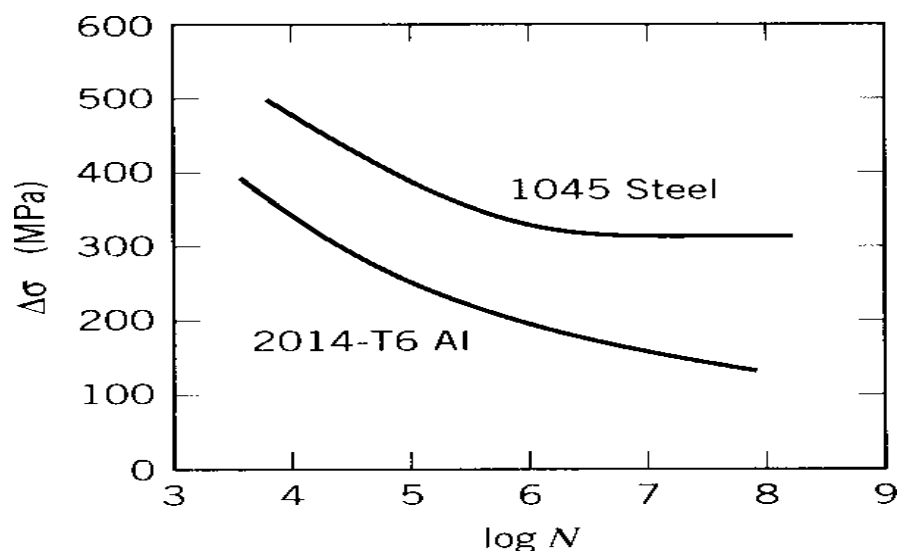


Figure 1.8 : Courbes S - N pour l'aluminium et l'acier à faible teneur en carbone. [6]

Dans certains matériaux, notamment les alliages ferreux, la courbe S - N finit par se stabiliser, de sorte qu'en dessous d'une certaine limite d'endurance σ_D , la rupture ne se produit pas, quelle que soit la durée du cycle des charges. Évidemment, le concepteur doit dimensionner la structure pour maintenir les contraintes en dessous de σ_e par un facteur de sécurité approprié si les charges cycliques doivent être supportées. Pour certains autres

matériaux comme l'aluminium, il n'existe pas de limite d'endurance et le concepteur doit faire en sorte que la durée de vie prévue de la structure soit inférieure au point de rupture sur la courbe S - N.

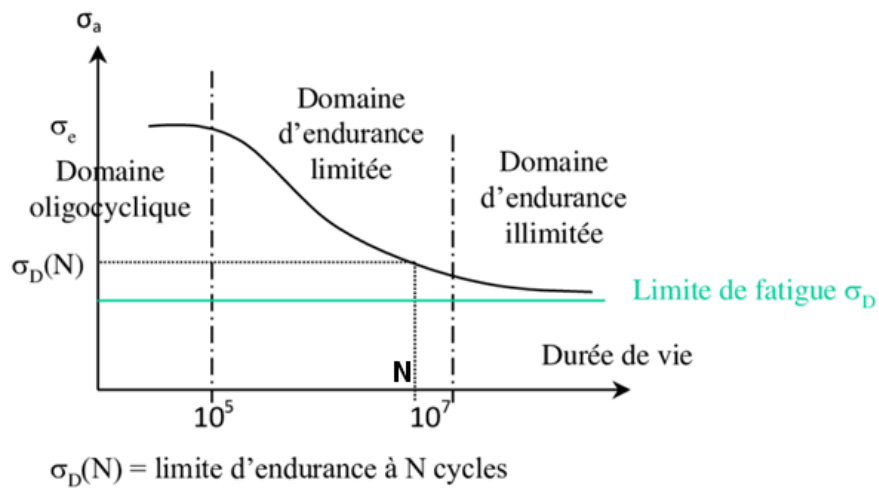


Figure 1.9 : La courbe de Wöhler

On peut diviser la courbe de Wohler en trois zones principales :

La première zone :

Elle délimite le domaine oligocyclique, qui correspond aux contraintes les plus grandes, supérieures à la limite d'élasticité, où le nombre de cycles à la rupture s'étend de 0.5 jusqu'à 10^4 . Dans cette zone, la rupture survient après un petit nombre d'alternances et est précédée d'une déformation plastique notable.

Par suite de l'amplitude de la contrainte maximale, chaque cycle d'effort entraîne une déformation plastique d'ensemble accompagnée le plus souvent soit d'un durcissement notable, soit d'un adoucissement du métal.

La deuxième zone :

C'est la zone qui délimite la fatigue ou l'endurance limitée, où la rupture atteint un nombre de cycles compris approximativement entre 10^4 et 10^5 , la rupture n'est pas accompagnée d'une déformation plastique. La réponse de l'éprouvette atteint dans ce cas un régime adapté élastique, mais il peut y avoir de la déformation plastique durant les premiers cycles, mais au bout d'un certain nombre de cycles, elle reste constante.

La troisième zone :

C'est la zone qui délimite le domaine d'endurance illimitée ou zone de sécurité, où D est un point pour les métaux ferreux qui est à l'infini. La courbe de Wöhler présente généralement une variation de pente plus ou moins marquée autour de 10^6 à 10^7 cycles, suivie d'une zone où la courbe tend vers une limite asymptotique parallèle à l'axe des N. En dessous de cette

valeur limite de σ , notée σ_D , nommée limite de fatigue ou limite d'endurance il n'y a jamais rupture par fatigue quel que soit le nombre de cycles appliqué.

5.4 Limite d'endurance :

Lorsqu'une pièce subit une sollicitation mécanique statique — c'est-à-dire que cette sollicitation est appliquée une fois et reste stable —, alors sa condition de résistance est exprimée par une valeur limite de la contrainte en tout point de la pièce, appelée résistance à la traction σ_m (exprimée en mégapascals, MPa) ; pour les matériaux ductiles, on impose de plus qu'ils ne doivent pas se déformer de manière définitive, la contrainte limite est la limite d'élasticité σ_e (en MPa également).[9]

Par contre, si une pièce subit des contraintes répétées, cycliques, alors elle peut présenter une rupture même si la contrainte n'a jamais dépassé la valeur σ_m . En effet, à chaque cycle, la pièce subit un micro-dommage, et c'est le cumul de ces dommages qui provoque la rupture. On parle de rupture en fatigue.

Toutefois, pour des contraintes très faibles, la durée de vie de la pièce, exprimée en nombre de cycles N , est très grand. On considère que la pièce a une durée de vie « infinie ».

La limite d'endurance est la valeur de la contrainte en dessous de laquelle on considère que la pièce ne se rompt pas à cause de la fatigue.

5.5 Classification des machines d'essai de fatigue :

Les éprouvettes d'essai de fatigue sont principalement décrites par le mode de chargement :

- Contrainte directe (axiale)
- Flexion plane
- Poutre en rotation
- Torsion alternée
- Contrainte combinée

Les machines d'essai, cependant, peuvent être des machines de type universel capables d'effectuer tous les modes de chargement ci-dessus en fonction de la fixation utilisée.[10]

5.5.1 Machine d'essai de fatigue axiale (contrainte directe) :

La machine d'essai de fatigue à contrainte directe soumet une éprouvette à une contrainte ou une déformation uniforme à travers sa section transversale. Pour une même section transversale, une machine d'essai de fatigue axiale doit être capable d'appliquer une force plus importante qu'une machine de flexion statique plane pour obtenir la même contrainte.



Figure 1.10-a : Machine d'essai servo-hydraulique HB.[11]

Des systèmes électromécaniques ont été développés pour les études de fatigue axiale. En général, ce sont des systèmes à boucle ouverte, mais ils ont souvent des fonctions caractéristiques partielles à boucle fermée pour corriger continuellement la charge moyenne.

Dans les machines à manivelle et à levier, une charge cyclique est appliquée à une extrémité de l'éprouvette par l'intermédiaire d'un levier calibré en fonction de la déflexion et entraîné par une manivelle à course variable. La charge est transmise à l'éprouvette par un système de flexion, qui fournit un mouvement rectiligne à l'éprouvette.

L'autre extrémité de l'éprouvette est reliée à un piston hydraulique qui fait partie d'un système de maintien de la charge à commande électro hydraulique qui détecte la déformation de l'éprouvette. Ce système rétablit automatiquement et progressivement la charge prédéfinie par l'intermédiaire du piston hydraulique.

Les systèmes Servo hydrauliques en boucle fermée offrent une commande, une surveillance et une polyvalence optimales dans les systèmes d'essais de fatigue. Ils peuvent être obtenus en tant que systèmes de composants et peuvent être mis à niveau si nécessaire. Un actionneur hydraulique est généralement utilisé pour appliquer la charge dans les essais de fatigue axiale.

L'excitation électromagnétique (vibrofore Figure 1-11-bou magnétostrictive est utilisée pour les systèmes d'entraînement des machines d'essais de fatigue axiale, en particulier lorsque de faibles amplitudes de charge et des durées de vie en fatigue élevées sont souhaitées pour de courtes durées d'essai). La fréquence cyclique élevée de ces types de

machines permet de tester de longues durées de vie en fatigue ($> 10^8$ cycles) en quelques semaines.



Figure 1.10-b Vibrophore [11]

Parmi les machines de haute technologie, nous pouvons citer aussi la machine du constructeur Instron permettant de faire des essais de fatigue des matériaux et structures de stent sur plusieurs échantillons simultanément pour gain de temps maximum.



Figure 1.10-c : Machine d'essais de fatigue des matériaux et structures de stent sur une série d'échantillons.

Notre objectif est aussi de pouvoir réaliser une machine d'essais de fatigue sur multi-échantillons.

5.5.2 Machines d'essais de fatigue par flexion :

Les types de machines de fatigue les plus courants sont des petites machines de fatigue par flexion. En général, ces systèmes simples et peu coûteux permettent aux laboratoires de mener des programmes d'essais étendus avec un faible investissement en matériel.

5.5.2.a Machines d'essais de fatigue par flexion plane :

Les essais de flexion plane répétée sont très utilisés et très appropriés pour les études de surface des matériaux puisque la surface est soumise à une très grande contrainte étant donné la faible épaisseur des échantillons. Ces échantillons peuvent être testés en porte-à-faux ou appuyés des deux côtés. On peut également appliquer un moment de flexion constant ou variable.

5.5.2.b Machines à faisceau rotatif :

Des machines à poutre rotative typiques sont présentées dans la figure suivante : Les machines R. R. Moore (à gauche) peuvent fonctionner jusqu'à 10 000 tr/min. Dans tous les essais de flexion, seul le matériau proche de la surface est soumis à la charge maximale ; par conséquent, dans une éprouvette de petit diamètre, seul un très petit volume de matériau est testé.

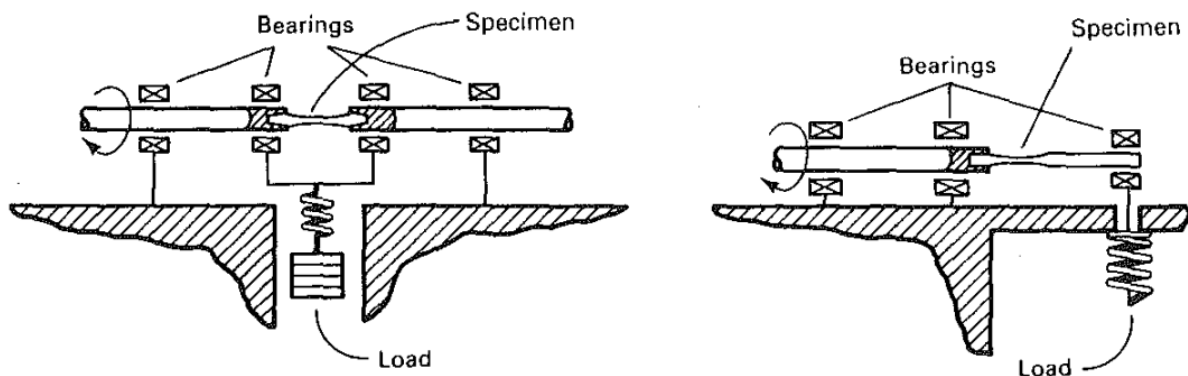


Figure 1.11 : Schéma des machines d'essai de fatigue à poutre rotative.[12]

5.5.3 Machines d'essai de fatigue en torsion :

Les essais de fatigue en torsion peuvent être réalisés sur des machines de type axial en utilisant les montages appropriés si la torsion maximale requise est faible.

Les machines d'essai de fatigue par torsion se composent de machines électromécaniques, dans lesquelles le mouvement linéaire est transformé en mouvement rotatif à l'aide de manivelles, et de machines servo-hydrauliques, dans lesquelles des actionneurs rotatifs sont incorporés dans un système d'essai en boucle fermée.

5.6 Éprouvettes d'essai de fatigue :

Une éprouvette de fatigue typique comporte trois parties : la section d'essai et les deux extrémités (têtes). Les extrémités sont conçues pour transférer la charge des poignées de la machine d'essai à la section d'essai et peut être identique, en particulier pour les essais de fatigue axiale.

La transition entre les extrémités des poignées et la zone d'essai est conçue avec des rayons larges et lisses pour diminuer les concentrations de contraintes dans la zone de transition.

La conception et le type d'éprouvette utilisée dépendent de la machine d'essai de fatigue utilisée et de l'objectif de l'étude de la fatigue. La section d'essai de l'éprouvette est réduite pour éviter la rupture des extrémités de la poignée et doit être proportionnée pour utiliser les plages supérieures de la capacité de charge de la machine de fatigue, c'est-à-dire en évitant les très faibles amplitudes de charge où la sensibilité et la réponse du système sont diminuées. Plusieurs types de spécimens d'essais de fatigue sont illustrés dans les figures suivantes :

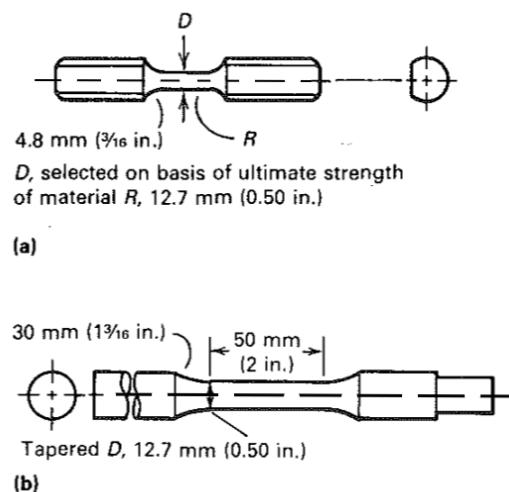


Figure 1.12 : Éprouvettes d'essai de fatigue typiques -1-

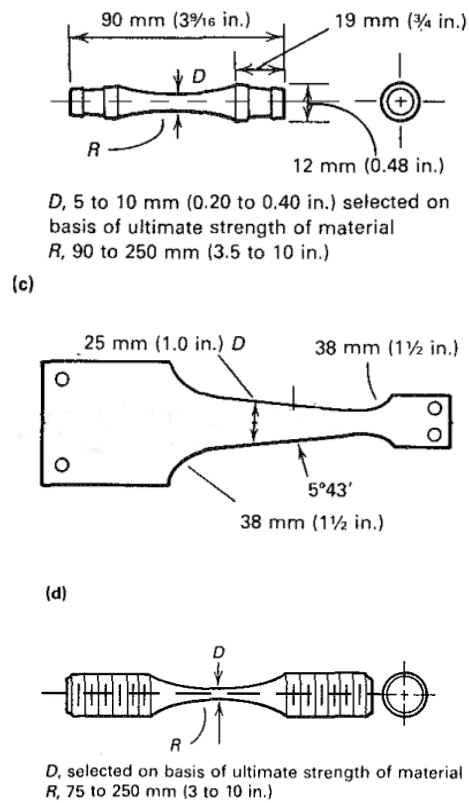


Figure 1.13 : Éprouvettes d'essai de fatigue -2-[12]

I-6 CONCLUSION :

Après avoir vu les effets catastrophiques que la fatigue peut causer, les chercheurs et les ingénieurs ont étudié ce phénomène et proposé des moyens pour minimiser ses effets, qui est l'essai de fatigue des matériaux avant et après la conception.

Notre objectif, en tant qu'ingénieurs en génie mécanique de l'Ecole Nationale Polytechnique, est de construire une machine de fatigue automatisée pouvant effectuer des essais de fatigue, en partant des projets de fin d'études de Mme. BOUMARAF Intisar et M. NADIR Issam et en poursuivant le travail précédent de M. BOUARADA Aymen.

Dans le prochain chapitre, nous présentons notre machine et détaillons la procédure d'usinage des pièces qui la constituent.

CHAPITRE II

LA MACHINE À RÉALISER ET LES OPÉRATIONS DE CORRECTION

II-1 INTRODUCTION :

Après avoir donné une idée générale sur le phénomène de la fatigue des matériaux, il est temps de présenter la machine d'essai de fatigue en flexion plane dont la réalisation fait l'objet de notre projet de fin d'études.

Avant de commencer la phase de réalisation, nous avons vérifié tous les fichiers CAO et les dessins de définition des pièces qui composent la machine, nous avons corrigé et apporté des modifications pour nous assurer que la machine fonctionnera correctement, mais il y a toujours des problèmes qui n'apparaissent qu'après la réalisation et le premier essai de montage.

Dans ce chapitre, nous présenterons la machine qui nous a inspiré, conçue et fabriquée en 2013 par des élèves ingénieurs en dernière année, et la version optimisée conçue par Monsieur BOUARADA Aymen dans le cadre de son PFE de l'année 2020/2021 et dont la réalisation fait l'objet de notre projet de fin d'études. Nous allons expliquer les plus grands problèmes auxquels nous avons dû faire face avant et après l'usinage et pendant l'essai de montage des pièces de la machine, et les modifications que nous avons apportées pour éliminer ou du moins diminuer les effets indésirables.

II-2 LA MACHINE À RÉALISER :

En 2013, BOUMARAF Intisar et NADIR Issam ont conçu une machine d'essai de fatigue en flexion plane pour des multi-éprouvettes. Ensuite, la machine a été réalisée dans l'atelier de M. ZEHANA. La figure ci-dessous montre cette machine.

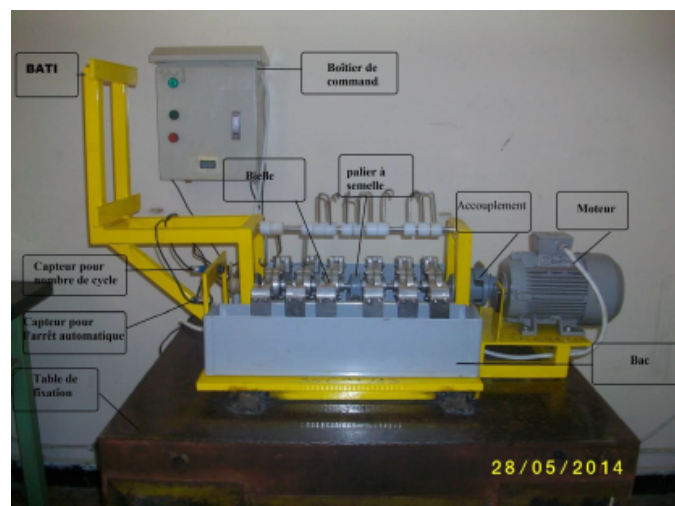


Figure 2.1 : La machine de fatigue en flexion plane conçue en 2013.

Ce système permet de réaliser des essais de fatigue en flexion plane pour 12 éprouvettes de même forme et composition, placées sur deux rangées, il a une performance très acceptable même avec des matériaux durs, mais le problème qu'il a est qu'il contient un très grand nombre de pièces à usiner, ce qui signifie que la fabrication des pièces est compliquée et

coûteuse et le problème le plus important est le bruit et les vibrations produits par cette machine.

M. BOUARADA a conçu dans son projet de fin d'études une machine qui vise à éliminer ces problèmes en réduisant le bruit et en minimisant les vibrations et le nombre de pièces à usiner. Notre objectif est de terminer son travail et prendre en considération les problèmes qu'étaient hors de sa portée lors de la phase de réalisation.

En effet, notre machine est composée d'un très petit nombre de pièces mécaniques, qui ont une forme simple et facile à usiner, dont la majorité sont des plaques percées et des pièces de révolution. Le mouvement de la machine est entraîné par un moteur pas à pas ou "STEPPER MOTOR", la rotation altérée du moteur est contrôlée par un microcontrôleur (Arduino).

Le moteur est relié à une vis sans fin par un accouplement élastique, et une douille à billes qui est montée sur la vis et fixée à une plaque de guidage, cette dernière est reliée à une autre plaque de guidage par des petites tiges appelées "Entretoises", ces deux plaques sont munies de cales qui permettent de fixer la partie supérieure des éprouvettes sur deux rangées, un nombre maximal de 6 éprouvettes peut être fixé sur chaque rangée, la partie inférieure des éprouvettes est fixée par un étau qui crée un encastrement, la stabilité de ce mécanisme est assurée au moyen d'une base et des plaques de fixation. Quant au guidage des plaques mobiles, il est obtenu par des tiges et des bagues de guidage.

La rotation altérée du moteur entraîne la rotation de la vis à billes, qui crée le mouvement prismatique altéré de l'écrou à billes, dans un mouvement de va-et-vient, entraînant un mouvement altéré des plaques de guidage, qui plieront les éprouvettes attachées de manière cyclique dans les deux sens, jusqu'à ce qu'elles se cassent.

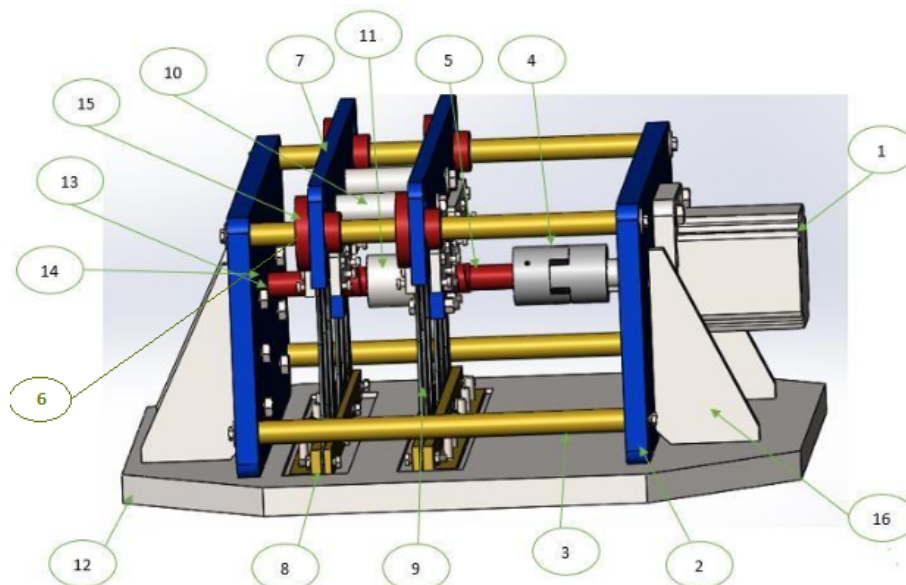


Figure 2.2 : les pièces constituant la machine.

Tableau 2.1 : Les éléments de la machine.

Numéro du composant	Nom du composant	Disponibilité du composant
1	Moteur pas-à-pas	Disponible dans le magasin du département
2	Plaques de fixation	À usiner (SIDER ANNABA)
3	Tiges de guidage	À usiner (SIDER ANNABA)
4	Accouplement élastique	À acheter
5	Vis à billes	Disponible dans le magasin du département
6	Bagues en bronze	À usiner (USIPRECIS)
7	Plaque de guidage	À usiner (SIDER ANNABA)
8	Étau	À usiner (SIDER ANNABA)
9	Éprouvette	À usiner (SIDER ANNABA)
10	Entretoises	À usiner (SIDER ANNABA)
11	Écrou à bille	Disponible dans le magasin du département
12	La base	À usiner (SIDER ANNABA)
13/14	Roulements et circuits	À acheter
15	Bague	À usiner (SIDER ANNABA)
16	Nervure	À usiner (SIDER ANNABA)

II-3 LES OPÉRATIONS DE CORRECTION :

Dans cette partie, nous présentons tous les problèmes auxquels nous avons dû faire face et comment nous avons réussi à les résoudre pour assurer le bon fonctionnement de la machine.

3.1 Avant la fabrication des pièces :

Avant de commencer à fabriquer les pièces de la machine à SIDER El-Hadjar, ANNABA nous avons vérifié la conception 3D et les dessins de définition de chaque pièce, puis nous avons apporté quelques modifications, qui sont :

- Percer les trous des vis sur la base sans les tarauder, car c'est une contrainte supplémentaire et n'a presque aucun effet nécessaire, mais peut générer des difficultés.
- Ajouter l'opération de rectification de la base pour assurer sa planéité.
- On a constaté que les trous des bagues de guidage sur la plaque de guidage sont beaucoup plus petits que le diamètre extérieur des bagues, il est donc impossible de les assembler et pour cela nous avons changé les diamètres et assuré l'assemblage.

3.2 Après le contrôle des pièces usinées et l'essai de montage :

Une fois que nous avons terminé l'usinage de la plupart des pièces mécaniques de notre machine à "SIDER" El-Hadjar, ANNABA, nous avons transporté ces pièces au laboratoire de notre département, le 24 mai 2022, où nous avons commencé à travailler sur la partie finale et la plus importante qui est l'assemblage des pièces de la machine.

Lors de la fabrication des pièces à Sider Annaba, nous avons fait de notre mieux pour nous assurer que les pièces usinées seront de haute qualité, mais malheureusement, il y avait certains détails qui étaient hors de notre portée, qui créeront des problèmes plus tard dans la machine si nous ne les corrigeons pas (instabilité, manque de précision et vibration). Donc avant de commencer à assembler les pièces, nous avons dû contrôler toutes les pièces usinées et nous assurer que chaque pièce est prête à être installée à sa place dans la machine.

3.2.1 Ajustage des tiges de guidage :

Le premier problème auquel nous avons fait face était le diamètre de la partie épaulée des tiges de guidage, qui ne glissait pas dans les quatre trous aux extrémités des plaques de fixation. Pour corriger ça, nous avons rectifié les diamètres de la partie épaulée des tiges et nous nous sommes assurés qu'elles rentrent parfaitement dans les trous.

3.2.2 Refaire les taraudages :

Au sein du complexe sidérurgique d'El-Hadjar, les tarauds disponibles dans leur magasin étaient de mauvaise qualité. Sachant que pour effectuer un taraudage manuel, il faut utiliser trois types de tarauds :

- Taraud Ébaucheur
- Taraud Intermédiaire
- Taraud Finisseur

Les tarauds finisseurs du complexe n'étaient pas de bonne qualité. Cela a généré un assemblage forcé des vis dans toutes les pièces.

Heureusement, notre département disposait de tous les tarauds nécessaires pour la rectification de ce problème. Nous avons donc procédé au re-taraudage.

3.2.3 Entretoises et système de guidage :

Nous avons constaté que les entretoises n'étaient pas à la même longueur. Une différence de 2 mm a été constatée. Une différence qui provoque un sérieux problème dans la machine si nous ne la corrigeons pas, à savoir un arc-boutement.

Nous avons constaté aussi que la planéité des deux plaques de guidage n'a pas été respectée. Les plaques sont légèrement fléchies. Donc les deux entretoises fixées au milieu du système ne vont pas suffire pour assurer le parallélisme des deux plaques, ce qui provoquera un

blocage au niveau du système de guidage (plaques/bagues de guidage), c'est-à-dire le dysfonctionnement de la machine.

Pour corriger ce problème, nous avons usiné chez USIPRECIS trois entretoises identiques placées entre les deux plaques en formant un plan. Une entretoise proche des bagues de guidage de chaque côté et une au centre et proche de la vis à billes, comme montré dans la figure suivante.



Figure 2.3 : Système de guidage après la première rectification.

3.2.4 Problème d'arc-boutement dans le système de guidage :

Après que le montage préliminaire de notre machine a été effectué, nous avons actionné le mouvement du système de guidage à la main, sans moteur. En essayant cela, nous avons remarqué qu'il y avait un problème **d'arc-boutement** dans le système en raison d'un parallélisme imparfait des plaques de guidage.

L'arc-boutement est un phénomène de blocage issu du frottement pour lequel un équilibre subsiste indépendamment de l'intensité de l'effort qui tend à le rompre, à condition que cet effort conserve sa direction et son sens. On constate souvent l'arc-boutement lors de mouvements de translation.[13]

Un exemple classique et connu de tous est celui du tiroir de commode qui se met légèrement en biais et se « coince » lorsque l'on veut le refermer. Chacun sait que ce n'est pas en poussant plus fort que l'on peut atteindre le but recherché. Le phénomène est facilement diminué si on cire ou savonne les faces latérales du tiroir, ce qui montre que les propriétés de frottement sont mises à contribution.

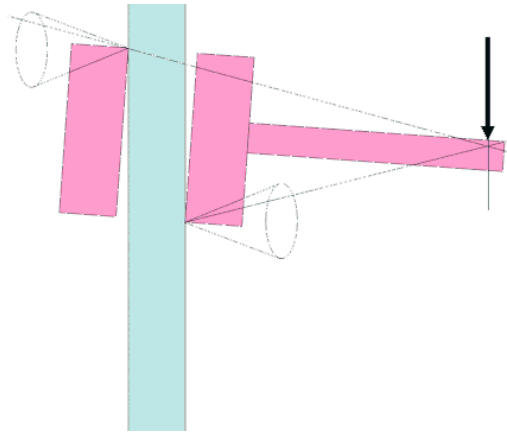


Figure 2.4 : Phénomène d’arc-boutement.

Afin de résoudre ce problème, nous avons conçu des bagues de sorte que chacune d'entre elles traverse complètement le système de guidage des deux côtés, augmentant ainsi la longueur de guidage. Dans ce cas, nous aurons deux anneaux que nous avons appelés " entretoises de guidage " et non quatre et à l'intérieur, nous avons monté une bague en bronze dans chaque côté pour réduire le frottement et assurer le glissement sur les tiges.

Nous avons conçu ces bagues pour qu'elles servent à la fois de guidage et d'entretoises, et nous avons réussi à obtenir un bien meilleur parallélisme des deux plaques de guidage tout en conservant l'entraxe souhaité. Il n'est donc plus nécessaire de laisser les entretoises précédemment montées sur les extrémités en gardant l'entretoise au milieu.

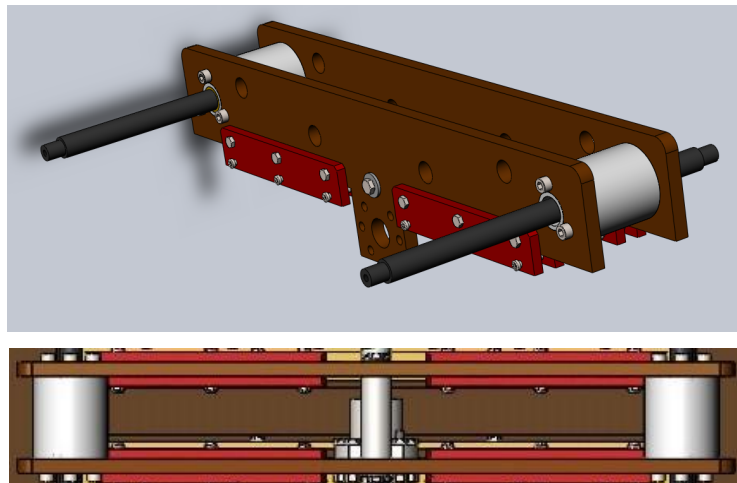


Figure 2.5 : Le système de guidage après la deuxième rectification.

3.2.5 Problème d’effort de la vis à billes sur le roulement et la plaque de fixation :

Lors du fonctionnement manuel de notre système de guidage, nous avons trouvé un autre problème potentiel qui deviendra sérieux lors du fonctionnement avec les éprouvettes.

Dans la conception d'origine, la vis va se déplacer de son emplacement supposé immobile, car l'accouplement élastique utilisé assure la transmission de la rotation de l'arbre moteur à la vis à billes, mais sans bloquer le déplacement entre les deux. Ceci va se traduire par un effort axial sur le roulement simple et la plaque de fixation entraînant un résultat désastreux sur le roulement initialement conçu et qui ne résiste pas aux efforts axiaux.

Pour éviter cela, nous avons redessiné et ensuite fabriqué la vis à billes pour qu'elle soit plus longue que l'ancienne, puis nous avons remplacé le roulement par deux butées à billes en les fixant par serrage sur la plaque de fixation, une à l'avant de la plaque de fixation et l'autre à l'arrière pour reprendre l'effort axial. Ces roulements sont très résistants aux forces axiales appliquées.

Pour assurer le blocage en translation de ces derniers, nous avons percé l'extrémité de la vis à billes suivie d'un taraudage M8, puis nous avons fixé le jeu de deux roulements avec une bague, une rondelle et une vis à six pans creux M8. La figure 2.6 montre le système final.

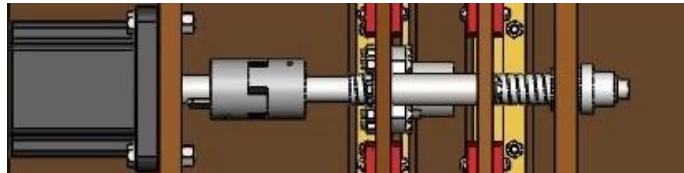


Figure 2.6 : Système de transmission de mouvement après la rectification.

II-4 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons montré l'importance de l'étude avant et après la fabrication pour éliminer tous les problèmes qui peuvent exister, et nous avons appris qu'il est très difficile d'usiner une structure simple et de fabriquer une pièce telle qu'elle est souhaitée dans le modèle de conception, donc les opérations d'ajustage et de rectification après la fabrication sont des opérations très importantes et nécessaires.

CHAPITRE III

GAMME DE FABRICATION DES PIÈCES DE LA MACHINE

III-1 INTRODUCTION :

Afin de fabriquer une machine, l'ingénieur prend en considération plusieurs aspects pour que la machine soit la plus simple, économique, fiable et la moins encombrante possible.

Il faut alors toujours penser à des solutions pour : assurer le bon fonctionnement de la machine, réduire le coût et ajuster les dimensions le maximum possible.

La version optimisée de la machine de test de flexion vise à respecter les conditions citées ci-dessus, étant moins spacieuse et encombrante que l'ancienne machine disponible au niveau du département et moins bruyante. Cette dernière est constituée des repères simples avec des procédés d'usinage faciles et faisables.

III-2 PRÉSENTATION DE NOTRE MACHINE :

Après avoir pris en considération tous les problèmes qui peuvent se poser et apporté toutes les modifications que nous avons jugées indispensables, tout en gardant le même principe de fonctionnement et la même structure, il est temps de présenter la version finale de notre machine avec toutes les pièces qui la constituent.

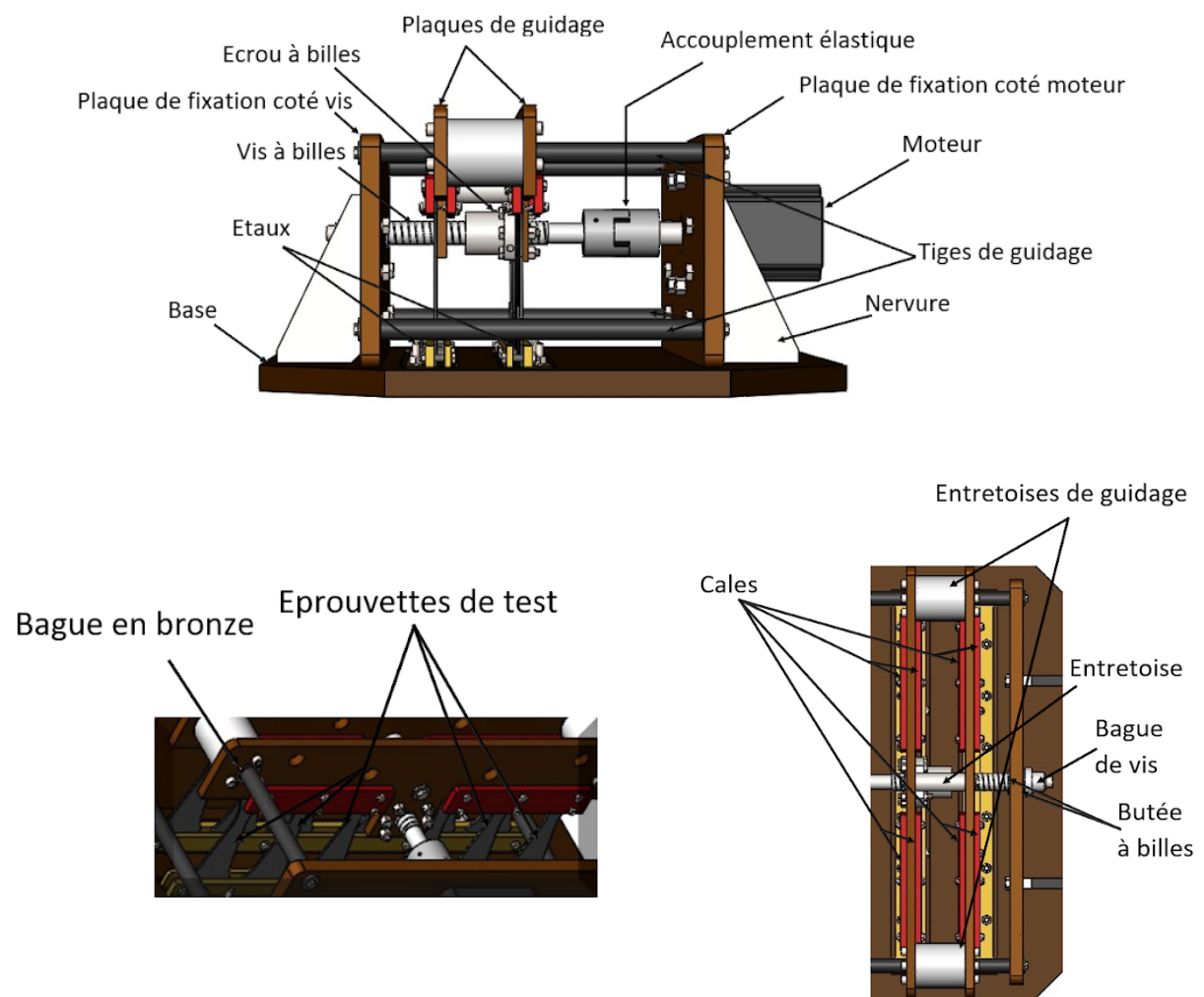


Figure 3.1 : Les pièces constituant la machine réalisée.

III-3 LES REPÈRES CONSTITUTIFS DE LA MACHINE :

3.1 Les organes usinés :

Les pièces listées dans le tableau suivant sont les pièces usinées et utilisées dans notre machine, nous avons usiné d'autres pièces, mais nous les avons changées comme expliqué dans le chapitre précédent.

Tableau 3.1 : Les pièces usinées.

Repère	Nom du repère	Quantité
1	Tiges de guidage	4
3	L'étai en L	2
4	face de l'étai	2
5/3	Plaque de fixation 1	1
5/4	Plaque de fixation 2	1
5/5	La base	1
6	Entretoise	1
7	Cales	8
9	Les nervures	4
5/1	Plaque de guidage 1	1
5/2	Plaque de guidage 2	1
10	Entretoises de guidage	2
11	Bagues en bronze	2
12	Bague de vis	1

3.2 Les organes achetés :

Certaines pièces de notre machine ne seront pas usinées, nous allons plutôt les acquérir par sous-traitance et les ajuster de façon à ce qu'elles puissent être montées et fonctionnent bien.

Tableau 3.2 : Les organes achetés

Pièce	Quantité
Accouplement	1

Vis à billes	1
Écrou à billes	1
Butée à billes	2
Vis de fixation et rondelles	/
Moteur pas à pas	1

Pour assurer la bonne précision d'usinage, il est nécessaire d'aller vers un endroit qui contient un parc machine diversifié possédant à la fois des machines conventionnelles et des machines à commandes numériques.

Pour cela, le Complexe Sidérurgique d'El-Hadjar et son équipe ont accepté avec grand plaisir de nous aider et réaliser notre projet. La majorité des pièces ont été réalisées aux AMM (Ateliers Maghrébins de Mécanique) à SIDER El-Hadjar, ANNABA, et la correction a été faite à l'atelier de Sarl USIPRECIS de M. Zehana.

III-4 ÉTAT DES LIEUX (PRÉSENTATION DES AMM) :

Dans le souci de répondre aux besoins accrus en pièces de rechange, l'entreprise nationale de sidérurgie s'est dotée en 1993 de nouvelles capacités de production. Les Ateliers Maghrébins de Mécanique (A.M.M) constituent une filiale de SIDER.

Les A.M.M ont pour vocation principale de répondre aux besoins de l'industrie sidérurgique et mécanique aussi bien en : pièces de rechanges consommables, ensembles mécaniques neufs, mais aussi pour la rénovation et les réparations.

Leurs capacités, tant matérielles qu'humaines, les mettent en position de satisfaire les besoins aussi bien sur le marché local qu'à l'exportation touchant la pétrochimie, les industries de transformation et autres.

Les Ateliers Maghrébins de Mécanique (A.M.M) sont situés dans l'enceinte du complexe sidérurgique MITTAL SIDER. Ils sont reliés au réseau routier, ferroviaire national et maghrébin ainsi qu'au port commercial d'ANNABA. Leurs ateliers s'étalent sur un terrain d'une superficie de 36 hectares et se composent d'un ensemble d'ateliers et de bâtiments auxiliaires :

- Un atelier mécanique ou usinage de $16128m^2$.
- Un atelier de forge de $5256 m^2$.
- Un parc à fer central de $2160 m^2$.
- Un atelier de caoutchoutage de $3200 m^2$.
- Des bâtiments auxiliaires (Bâtiment Administratif, Technico Commercial, etc....)

Le potentiel humain des A.M.M est composé d'ingénieurs, de techniciens et d'opérateurs hautement qualifiés ayant accumulé plusieurs années d'expérience dans différentes spécialités de la mécanique (études, méthodes de programmation, forage, traitement thermique, tournage, fraisage, alésage, etc....).

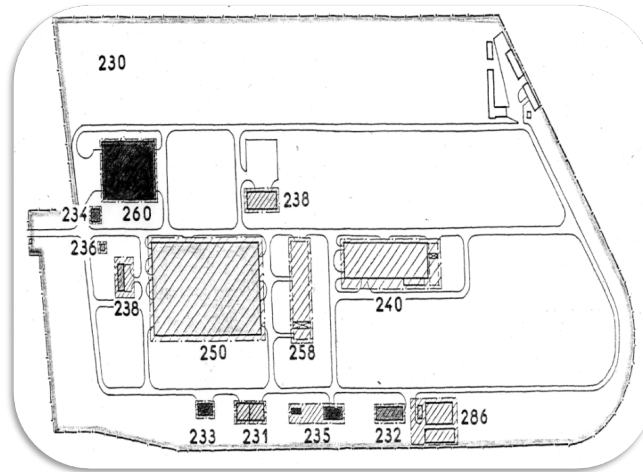


Figure 3.2 : Découpage Zonal des AMM

230 - AMM-service commun

231- Sous-traitance de distribution électrique.

240 - AMM-Forage.

232- Station des compresseurs.

250 - AMM-Usinage.

233 – Chaufferie.

258 - AMM- parc à fer.

234 - Station du condensat.

286 - Magasins centraux.

236 - Station de pompage des eaux usées.

260 - AMM-Caoutchoutage.

238 - Services administratifs.

4.1 Atelier mécanique, Atelier d'usinage 250 :

Équipé de 250 machines de toutes spécialités (tournage, fraisage, taillage, rectification, affûtage, rechargement, soudage, oxycoupage et traitement thermique) et conçu pour la réalisation unitaire ou en petites séries de pièces mécaniques à partir d'ébauches de forge, de fonderie et produits laminés. Équipé d'une centaine de machines-outils conventionnelles et à commande numérique destinée à la fabrication et à la rénovation d'équipements mécaniques.

III-5 MATÉRIAU UTILISÉ POUR LA FABRICATION DES PIÈCES :

Deux types de matériaux étaient disponibles à l'AMM pour la fabrication de nos pièces, nous avons choisi l'acier XC48 et non l'acier A37 après avoir consulté nos encadrants en raison de ses caractéristiques différentes qui le rendent à la fois résistant et facilement usinable.

Analyse chimique moyenne de l'XC48 :

- C : 0,42/0,50%
- Mn : 0,50/0,80%
- Si : 0,40% maxi
- P : 0,035% maxi

- S : 0,035% maxi
- Mo : 0,10% maxi

Caractéristiques mécaniques l'XC48 :

Tableau 3.3 : Analyse caractéristique de l'acier XC48

État normalisé	État transformé à froid
Rm : 560/620 N/mm ²	Rm : 630/850 N/mm ²
Re: 275/340 N/mm ²	Re : 370/490 N/mm ²
A% : 14/16	A% : 14/17

Applications :

- Acier carboné, à teneur plus élevée que pour les aciers C35 et C40, utilisé en mécanique générale pour sa bonne usinabilité et ses caractéristiques mécaniques.
- Apte aux traitements thermiques : ex. à l'huile 820-860 °C.
- Pièces soumises aux chocs et nécessitant une bonne résistance : engrenages, vis sans fin, axes, paliers, pignons, boulonnerie, forge (leviers, arbres...).
- Soudabilité : médiocre (précautions nécessaires, préchauffage et revenu de stabilisation recommandés).[14]

Masse volumique = 7,85 kg/dm³

III-6 PROCÉDURE D'USINAGE DES PIÈCES :

Maintenant que nous avons choisi le type de matériau que nous allons utiliser pour la fabrication de nos pièces, nous allons enfin passer à la procédure d'usinage de chaque pièce.

Il est important de noter que presque toutes les pièces sont prismatiques (c'est-à-dire qu'elles vont être usinées par procédé de fraisage). Le reste des pièces sont de révolution (c'est-à-dire qu'elles vont être usinées par procédé de tournage)

Le tableau ci-dessous reprend les pièces qui vont être usinées par fraisage et celles usinées par tournage :

Tableau 3.4 : Classification des pièces par procédé de fraisage ou tournage

FRAISAGE	TOURNAGE
Les cales	Tiges de guidage
L'étai et sa face	Entretoise
Nervures	Entretoises de guidage
Plaques de guidage (1 et 2)	Bagues en bronze

Plaque de fixation (1 et 2)	L'accouplement
La base	La vis sans fin

6.1 FRAISAGE :

6.1.1 L'étai et sa face :

Les étaux en forme L servent à bloquer la partie inférieure des éprouvettes, à l'aide de leur face pour assurer le bon blocage de ces dernières. Nous avons effectué six (06) trous de 6.5 mm de diamètre à travers lesquels vont passer des boulons M6 à six pans creux. Les éprouvettes seront mises entre l'étai en forme L et sa face puis seront fixées à l'aide des vis.

Le procédé d'usinage était simple, nous avons déjà trouvé des chutes de l'étai. En ce qui concerne la face de l'étai, l'équipe sur place nous a suggéré de couper une tôle de longueur, largeur et épaisseur légèrement supérieures aux dimensions finies puis les usiner grâce à la fraiseuse conventionnelle MU5.

Les étapes sont :

- Bridage de la pièce.
- Mise en longueur de la pièce.
- Mise à la largeur.
- Mise à l'épaisseur.
- Ébavurage
- rectification des pièces pour une finition optimale.

Tableau 3.5 : Gamme d'usinage de la face de l'étai

FEUILLE D'ANALYSE DE FABRICATION		CLIENT	N° COMMANDE	N°DT	CONTRÔLE		CODE D'ARTICLE			
DESIGNATION DU TRAVAIL		ENP	77409	17684	NOM DU PREPARATEUR		DATE			
CF : Face de l'étai		2	Rep : 3	Firas Assil SAADANE Djamel Eddine TAHRAOUI		25/03/22				
N° PHASE	DETAILS DES OPERATIONS	machine utilisée	CODE OUTIL	Accessoire de montage	données de coupe			TP (H)	Livrée	OBSERVATIONS DU CONTROLE
					N	a	Pp			
10	Oxycoupage	CT2040						1		
	Couper Tôle EP: 10x30x450									
	Matière XC48									
20	Contrôle								CTL	
30	Fraisage	MU5						8	Fraisage	
	Brider la pièce									
	réaliser le parallélépipède EP: 5x20x440									
	Sur la face A à la longueur L=11 Par 10									
	percer cinq trous (05) ø6.5 débouchants									
	L'entraxe 126,5/82,5/82,5/126,5									
50	Contrôle								CTL	Contrôlé par pied à coulisse



6.1.2 Les plaques de guidage :

Les plaques de guidage seront les pièces mobiles de la machine. Elles subissent un mouvement de va-et-vient qui sollicitent les éprouvettes d'essais.

Pour une précision maximale, les plaques de guidage passeront par deux machines. Tout d'abord, et comme toutes les autres pièces, nous avons coupé des tôles de dimensions légèrement supérieures aux dimensions finies puis les mettre dans la fraiseuse MU5 l'une au-dessus de l'autre afin de gagner du temps d'usinage pour :

- La mise en longueur.
- La mise à la largeur.
- Réalisation de deux entailles afin que les plaques aient leurs formes en T (afin de réduire le poids de la machine).
- La mise à l'épaisseur.

Pour le perçage des trous, cela nécessitera une très grande précision pour que les trous soient coaxiaux. Pour cela, nous avons utilisé une fraiseuse à commandes numériques SX HURON-Graffenstaden.

L'opération de perçage est simple et consiste à :

- Centrer l'endroit où l'on souhaite percer le trou à l'aide d'un foret à centrer.
- Mettre un foret de diamètre souhaité, puis exécuter le perçage. Dans notre cas, il s'agit d'un foret de 6.5 mm de diamètre.

Le reste des pièces suit le même processus d'usinage que ses semblables.

Tableau 3.6 : Gamme d'usinage de la première plaque de guidage

FEUILLE D'ANALYSE DE FABRICATION		CLIENT	N°DT	CONTRÔLE		CODE D'ARTICLE		
		ENP	17684					
DESIGNATION DU TRAVAIL		N° PIECES	NOM DU PREPARATEUR			DATE		
CF : Plaque de guidage		1	Firas Assil SAADANE Djamel Eddine TAHRAOUI		25/03/22			
N° PHASE	DETAILS DES OPERATIONS	machine utilisée	a	Pp	TE (H)	TP (H)	Livrée	OBSERVATIONS DU CONTROLE
10	Oxycoupage	CT2040				30'		
	Couper Tôle EP: 15x130x510							
	Matière XC48							
20	Contrôle						CTL	
30	Fraisage	MU5				4	Fraisage	
	Brider la pièce							
	réaliser le parallélépipède EP: 10x118x500							
	Réaliser l'entaille : 10x220; Profondeur Prof=48							
	Réaliser la deuxième entaille : 10x220; Profondeur Prof=48							
40	Contrôle						CTL	
50	Fraisage CNC	SXB				3	Fraisage	
	Brider la pièce							
	à la longueur L= 37 par 36 percer deux (02) trous ø20N6 débouchants							
	Entraxe E=426							
	à la longueur L= 37 par l'axe du trou percer trois trous (03) ø6,5 débouchants							
	Entraxe Ø36 ; avec un angle $\alpha=120^\circ$ sur les deux (02) côtés							
	à la longueur L=70 par 9 percer (06) trous ø6,5 débouchants							
	Entraxe E=65/65/10/65/65							
	à la longueur L=180/38 percer deux trous (02) ø16N6 débouchants							
	Entraxe E=140							
	à la longueur L=30 par 20,75 percer (01) trou ø22 débouchant.							
60	Contrôle						CTL	Contrôlé par Pied à coulisse

Tableau 3.7 : Gamme d'usinage de la deuxième plaque de guidage

FEUILLE D'ANALYSE DE FABRICATION		CLIENT	N°DT		CONTRÔLE		CODE D'ARTICLE			
		ENP	17684							
DESIGNATION DU TRAVAIL		N° PIECES	NOM DU PREPARATEUR				DATE			
CF : Plaque de guidage fin		1	Firas Assil SAADANE Djamel Eddine TAHRAOUI				25/03/22			
N° PHASE	DETAILS DES OPERATIONS	machine utilisée	Accessoire de montage	données de coupe			TE (H)	TP (H)	Livrée	OBSERVATIONS DU CONTROLE
				N	a	Pp				
10	Oxycoupage Couper Tôle EP: 15x130x510 Matière XC48	CT2040						30'		
20	Contrôle								CTL	
30	Fraisage Brider la pièce réaliser le parallélépipède EP: 10x121x500. Réaliser 2 Rayons R=10 Réaliser l'entaille : 10x220; Profondeur Prof=48 Réaliser la deuxième entaille : 10x220; Profondeur Prof=48	MU5						2	Fraisage	
40	Contrôle								CTL	
50	Fraisage CNC Brider la pièce à la longueur L= 37 par 36 percer deux (02) trous ø20N6 débouchants Entraxe E=426 à la longueur L= 37 par l'axe du trou percer trois trous (03) ø6,5 débouchants Entraxe Ø36 ; avec un angle $\alpha=120^\circ$ sur les deux (02) côtés à la longueur L=70 par 9 percer (06) trous ø6,5 débouchants Entraxe E=65/65/10/65/65 à la longueur L=180/38 percer deux trous (02) ø16N6 débouchants Entraxe E=140 à la longueur L=30 par 23,75 percer (01) trou ø22 débouchant. Percer (04) trous ø7 débouchants ; Entraxe ø46,67 d'angle $\alpha=90^\circ$ Percer deux trous ø7 débouchants ; Entraxe ø47,5	SXB						5	Fraisage	
60	Contrôle								CTL	Contrôlé par pied à coulisse

6.1.3 Les plaques de fixation :

Les plaques de fixation sont les plaques sur lesquelles seront monté le moteur, l'accouplement, suivi de la vis sans fin et enfin les roulements et elles suivront le même procédé que les plaques de guidage :

- Couper deux tôles des dimensions supérieures aux dimensions finies
- Les brider dans la fraiseuse MU5
- Effectuer la mise en longueur, largeur et la mise à l'épaisseur
- Transporter les pièces dans la fraiseuse SX afin de percer les trous : sur la face des plaques, puis sur la face de leur épaisseur (les plans seront mis dans l'annexe)
- Tarauder les trous d'avant trou de 8.5 mm de diamètre à l'aide de tarauds M10.

Tableau 3.8 : Gamme d'usinage des plaques de fixation.

FEUILLE D'ANALYSE DE FABRICATION		CLIENT	N°DT			CONTRÔLE		CODE D'ARTICLE		
		ENP	17684							
DESIGNATION DU TRAVAIL		N° PIECES	NOM DU PREPARATEUR					DATE		
CF : Plaque de fixation		1	Firas Assil SAADANE Djamel Eddine TAHRAOUI					25/03/22		
N° PHASE	DETAILS DES OPERATIONS	machine utilisée	Accessoire de montage	données de coupe			TE (H)	TP (H)	Livrée	OBSERVATIONS DU CONTROLE
				N	a	Pp				
10	Oxycoupage Couper Tôle EP: 20x190x480 Matière XC48	CT2040						30'		
20	Contrôle								CTL	
30	Fraisage Brider la pièce réaliser le parallépipède EP: 15x180x470 .	MU5						2	Fraisage	
40	Contrôle								CTL	
50	Fraisage CNC Brider la pièce à la longueur L= 235 par 75,25 percer un (01) trou ø28H7 débouchant	SXB						5	Fraisage	
	à la longueur L= 24 par 14 percer quatre trous (04) ø12N6 débouchants Entraxe 426/137									
	à la longueur L=117,5 par 70 percer Six trous (06) trous ø9 débouchants Entraxe E=37,5/236. -TOURNER LA PIECE-									
	à la longueur L=190,8 par 31,057,5 percer quatre trous (04) ø8,5; Entraxe 88,4/88,4									
	TOURNER LA PIECE sur ø28 réaliser un lamage ø32H7 ; Longueur L=10									
	paisseur à la longueur L=60 par 7,5 percer six trous (06) ø8,5; profondeur=25; Entraxe =70									
60	Contrôle								CTL	
70	Ajustage Tarauder six (06) trous M10; L=20							4		
80	Contrôle								CTL	

6.1.4 La base :

La base est le cœur de la machine. Presque toutes les pièces seront assemblées sur cette dernière. Nous nous sommes assurés de rectifier les faces supérieure et inférieure de la plaque afin d'assurer un état de surface proche de la perfection.

Comme cité dernièrement, la procédure consiste à :

- Couper une tôle des dimensions supérieures aux dimensions finies
- La brider dans la fraiseuse MU5
- Effectuer la mise en longueur, largeur et la mise à l'épaisseur
- Transporter les pièces dans la fraiseuse SX afin de percer les trous (avec lamage)
- Réaliser les deux rainures.
- Rectification

Tableau 3.9 : Gamme d'usinage de la base

FEUILLE D'ANALYSE DE FABRICATION		CLIENT	N° COMMANDE	N°DT		CONTRÔLE		CODE D'ARTICLE			
		ENP	77409	17684							
DESIGNATION DU TRAVAIL		N° PIECES	REPÈRE	NOM DU PREPARATEUR				DATE			
CF : LA BASE		1	Rep : 5	Firas Assil SAADANE Djamel Eddine TAHRAOUI				25/03/22			
N° PHASE	DETAILS DES OPERATIONS	machine utilisée	CODE OUTIL	Accessoire de montage	données de coupe			TE (H)	TP (H)	Livrée	OBSERVATIONS DU CONTROLE
					N	a	Pp				
10	OXYCOUPAGE	CT2040								CTL	
	Couper Tôle:								30'		
	EP: 30 × 470 × 580										
	Matière : XC48										
20	CONTRÔLE									Fraisage	
30	FRAISAGE	MUS		Bridage						CTL	
	Réaliser le // : EP 20 × 460 × 570								2H		
40	CONTRÔLE	21								Fraisage CNC	
50	FRAISAGE CNC									CTL	
	à L= 88/110 Percer 12 Trous										
	Ø 11 débouchants; l'entraxe : 264/70								14H		
	à L= 30.5/167.5 Percer 8 Trous										
	Ø 8 débouchants; l'entraxe : 20/239/235										
	à L= 110/62 Réaliser 2 Rainures										
	b= 45 ; L= 446 ; Prof= 3.5										
	L'entraxe : 33										
	à L= 122.5/125 dans la Rainure										
	Percer 12 Trous Ø 6.5 débouchants										
	L'entraxe 98/60										
	*TOURNER LA PIECE										
	Sur Ø11 ; Réaliser Lamage Ø17; Prof= 16										
	Sur Ø9 ; Réaliser Lamage Ø14; Prof= 16										
	Sur Ø6.5 dans les 2 Rainures										
	Réaliser Lamage Ø11; Prof=11.5										
	Executer les 4 chs= 100 × 45°										
60	CONTRÔLE									Ajustage	Contrôlé par Comparateur, après rectif

6.1.5 Les nervures :

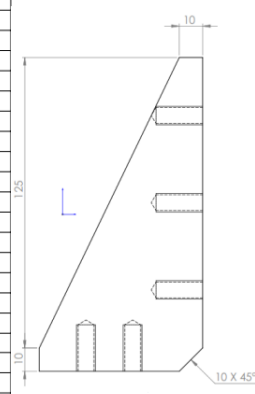
Les nervures servent de support aux plaques de fixation. Elles sont fixées sur la base et les plaques par des vis.

Le procédé restera le même :

- Couper des tôles des dimensions supérieures aux dimensions finies
- Les brider dans la fraiseuse MU5
- Effectuer la mise en longueur, largeur et la mise à l'épaisseur
- Réaliser le chanfrein sur la partie inférieure.
- Transporter les pièces dans la fraiseuse SX afin de percer les trous
- Taraudage des trous à l'aide des tarauds M8

Tableau 3.10 : Gamme d'usinage des nervures

FEUILLE D'ANALYSE DE FABRICATION		CLIENT		N° COMMANDE		N°DT		CONTRÔLE		CODE D'ARTICLE		
		ENP		77409		17684						
DESIGNATION DU TRAVAIL		N° PIECES		REPERE		NOM DU PREPARATEUR				DATE		
CF : Nervure		4		Rep : 9		Firas Assil SAADANE Djamel Eddine TAHRAOUI				25/03/22		
N° PHASE	DETAILS DES OPERATIONS	machine utilisée	CODE OUTIL	Accessoire de montage	données de coupe			TE (H)	TP (H)	Livrée	OBSERVATIONS DU CONTROLE	
N	a	Pp										
10	OXYCOUPAGE	CT2040								CTL		
	Couper Tôle:								30'			
	EP: 20										NB : Existe des gaussets au niveau TTH	
	Selon gabarit : BM 77409											
	Matière : XC48											
20	CONTRÔLE									Fraisage		
30	FRAISAGE	MUS								CTL		
	Mise à l'épaisseur : 12			Bridage								
	Surfacer les deux faces A et B								3H			
	Respectant la cote L=70											
	Surfacer les deux faces C et D											
	Respectant la cote L=135											
	à L= 10, Réaliser la pente de l'angle a=25°, 38', 27"											
	Sur L=125											
	Sur la surface A											
	à L= 35/6 Percer 3 trous Ø 6.8, L=25											
	L'entraxe 37.5											
	Sur la face D											
	à L=20/6 Percer 2 trous Ø 6.8, L=25											
	L'entraxe 20											
40	CONTRÔLE											
50	AJUSTAGE								1H	Ajustage		
	Tarauder 5 trous M8, L=20									CTL		
60	CONTRÔLE									GSM	Controle par pied à coulisse	



6.1.6 Les cales :

Les cales sont des éléments fixés sur un des ensembles de trous percés dans les plaques de guidage. Deux cales sont positionnées face à face. Des vis permettent de les bloquer. Puis l'ensemble cale-plaque de guidage, sert à fixer la partie supérieure des éprouvettes entre deux cales.

Comme pour le procédé d'usinage des éprouvettes, nous avons effectué un point de soudure pour les 4 cales afin de gagner du temps et assurer que les cales soient parfaitement identiques. Le reste du procédé reste le même :

- Couper des tôles des dimensions supérieures aux dimensions finies.
- Les brider dans la fraiseuse MU5.
- Effectuer la mise en longueur, largeur et la mise à l'épaisseur.
- Réaliser le chanfrein sur la partie supérieure.
- Transporter les pièces dans la fraiseuse SX pour percer les trous.
- Tarauder des trous à l'aide des tarauds M6.

Tableau 3.11 : Gamme d'usinage des cales

FEUILLE D'ANALYSE DE FABRICATION		CLIENT	N° COMMANDE	N°DT		CONTRÔLE		CODE D'ARTICLE			
		ENP	77409	17684							
DESIGNATION DU TRAVAIL		N° PIECES	REPÈRE	NOM DU PREPARATEUR					DATE		
CF : Cale		2	Rep : 7	Firas Assil SAADANE Djamel Eddine TAHRAOUI					25/03/22		
N° PHASE	DETAILS DES OPERATIONS	machine utilisée	CODE OUTIL	Accessoire de montage	données de coupe			TE (H)	TP (H)	Livré	OBSERVATIONS DU CONTROLE
10	OXYCOUPAGE Couper Tôle: EP: 15 × 40 × 170 Matière : XC48	CT2040									
20	CONTROLE										
30	FRAISAGE Brider la pièce Réaliser le // : EP : 7 × 30 × 160 Exécuter 2 chs 3×45° à L= 15/8.5 Percer 3 Trous Ø 6.5 débouchants; l'entraxe : 65 à L= 15/5 Percer 3 Trous Ø 5 débouchants; l'entraxe : 65	MUS									
40	CONTROLE										
50	AJUSTAGE Tarauder 3 trous M6 débouchants										
60	CONTROLE									Contrôlé par cales étalonnées, comparateur	

6.2 TOURNAGE :

6.2.1 Les tiges de guidage :

Les tiges de guidage sont les pièces sur lesquelles les plaques de fixation glissent par le biais de coussinets en bronze afin d'effectuer leur mouvement de va-et-vient.

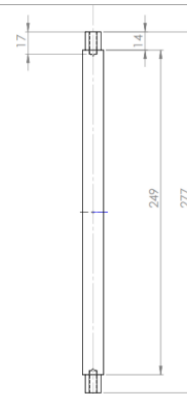
Pour diminuer les frottements et assurer un bon glissement, nous avons effectué une rectification de haute précision sur la partie glissante de la tige. Les tiges ont été réalisées dans le tour conventionnel parallèle 16D20.

Le procédé d'usinage est le suivant :

- Bridage de la pièce dans le tour.
- Chariotage au diamètre souhaité.
- Réalisation de l'épaulement.
- Rectification.

Tableau 3.12 : Gamme d'usinage des tiges de guidage

FEUILLE D'ANALYSE DE FABRICATION			CLIENT	N°DT		CONTRÔLE		CODE D'ARTICLE		
			ENP	17684						
DESIGNATION DU TRAVAIL			N° PIECES	NOM DU PREPARATEUR				DATE		
CF : Tiges de guidage			4	Firas Assil SAADANE Djamel Eddine TAHRAOUI				25/03/22		
N° PHASE	DETAILS DES OPERATIONS	machine utilisée	Accessoire de montage	données de coupe			TE (H)	TP (H)	Livrée	OBSERVATIONS DU CONTROLE
				N	a	Pp				
10	Débitage Couper Rond : \varnothing 30, L=300 Matière XC48	EBS360						2		
20	Contrôle								CTL	
30	Tournage Montage en l'aire Dresser la face charioter au \varnothing 16,5, L=277 charioter au \varnothing 12 (plus ou moins 0,1), L=14 percer un trou (01) \varnothing 5, L=18,5	16D20						12	Tournage	
	Tourner la pièce Mise à longueur L= 277 charioter au \varnothing 12 (plus ou moins 0,1), L=14 percer un trou (01) \varnothing 5, L=18,5									CTL
40	Contrôle									
50	Adjustage Tarauder deux trous (02) M6, L=17							2		
60	Contrôle									
70	Réctification Réctifier \varnothing 16g6, L=249	3Y133						6		
80	Contrôle								CTL	Contrôlé par pied à coulisse



6.2.2 L'entretoise :

Comme mentionné dans le chapitre précédent, l'entretoise qui est dans le milieu du système de guidage a pour but de synchroniser le mouvement des deux plaques de guidage en les fixant ensemble grâce à des trous taraudés où des vis M8 entreraient. Comme cité précédemment, cette pièce a été fabriquée à l'atelier de USIPRECIS.

Le procédé d'usinage est le suivant :

- Bridage de la pièce dans le tour.
- Chariotage au diamètre souhaité.
- Réalisation de l'épaulement.
- Perçage des trous sur les côtés.

6.2.3 Les entretoises de guidage :

Les entretoises de guidage ont pour but d'assurer le guidage linéaire et le parallélisme des plaques de guidage. Elles sont fixées sur ces dernières à l'aide de trois boulons disposés à 120°.

- Bridage de la pièce dans le tour.
- Chariotage au diamètre souhaité.
- Réalisation de l'épaulement.
- Réalisation du trou de diamètre intérieur.
- Perçage des trois trous d'angle 120° à l'aide d'un diviseur.

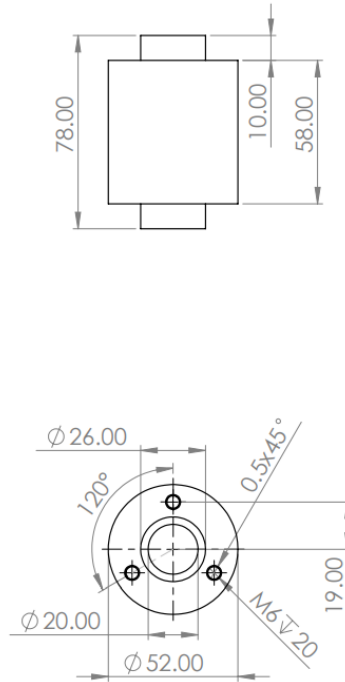


Figure 3.3 : Dessin de définition de l'entretoise de guidage.

6.2.4 Les bagues en bronze :

Les bagues en bronze ont pour but d'assurer le glissement du système de guidage sur les tiges. Elles seront montées par ajustement avec serrage sur le diamètre intérieur des entretoises de guidage.

Afin de les usiner, nous avons ramené des tiges en bronze avec un diamètre légèrement supérieur au diamètre souhaité. Le procédé d'usinage est le suivant :

- Bridage de la pièce sur le tour.
- Chariotage du diamètre extérieur des coussinets aux dimensions souhaitées.
- Perçage du diamètre intérieur.
- Alésage du diamètre intérieur aux dimensions souhaitées.

À la fin de l'usinage, les coussinets correspondent à ce plan :



Figure 3.4 : Plan des bagues en bronze.

III-7 PIÈCES ACHETÉES :

Lors de la construction de notre machine, nous n'avons pas usiné toutes les pièces à partir du matériau brut, afin d'économiser le temps et les efforts. Il y a donc des pièces qui doivent être achetées que nous ajustons par la suite pour qu'elles s'adaptent à notre machine et qu'elles se fixent aux autres pièces.

7.1 Butée à billes :

Au centre de la plaque de fixation, et des deux côtés, deux butées à billes de diamètre intérieur égale à 16 mm qui entrent avec serrage dans la vis, et de diamètre extérieur égale à 28 mm, monté par serrage avec la plaque à l'avant et à l'arrière.

Ces roulements sont placés pour résister aux efforts axiaux, sans créer un frottement qui bloque la rotation de la vis.



Figure 3.5 : Butée à billes.

7.2 Accouplement élastique :

Afin d'absorber et d'amortir les irrégularités du couple entre l'arbre moteur et la vis sans fin, et de tolérer les désalignements et les décalages entre les deux arbres, on a utilisé un accouplement élastique, constitué de deux éléments rigides en fonte comme le montre la figure suivante (images a et c) et d'un élément élastique, le Flectore (image b).

Les accouplements élastiques bruts sont disponibles sur le marché avec un prix raisonnable et une précision très importante, c'est pourquoi nous avons préféré l'acheter et ne pas l'usiner à Annaba.



a. Accouplement partie moteur

b. Flectore

c. Accouplement partie vis

Figure 3.6 : Pièces d'accouplement élastique.

La figure suivante montre le montage des pièces d'accouplement élastique telles qu'elles ont été achetées. Comme le montre la photo, ces pièces sont commercialisées avec un diamètre standard et relativement petit (10 mm), mais elles sont facilement usinables.

Pour que l'accouplement s'adapte à notre machine, nous devons l'usiner. Pour ce faire, nous avons demandé à M. ZEHANA, de réaliser dans un de ses tours le diamètre requis dans chaque partie de l'accouplement. Les diamètres étaient de 19 mm pour la partie moteur de l'accouplement et de 17 mm pour la partie vis de l'accouplement. Une rainure de clavette de chaque côté, clavette de 6 mm et 5 mm de largeur pour la vis et le moteur respectivement. Comme le montrent les figures suivantes, ont été usinées.

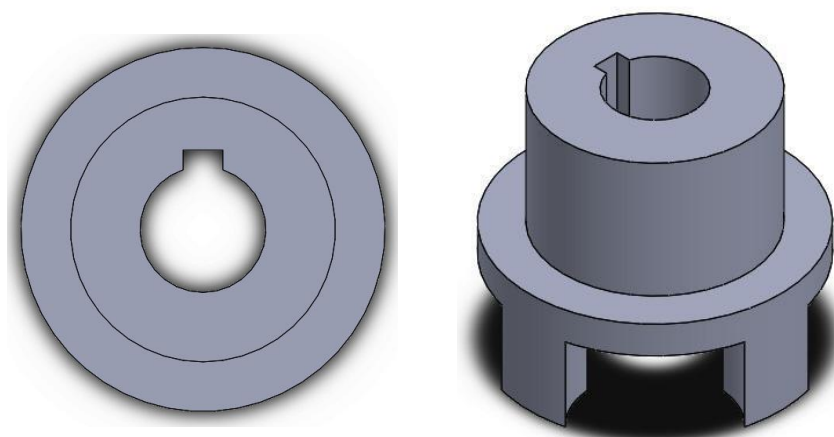


Figure 3.7 : La conception de deux parties d'accouplement à l'aide de Solidworks.

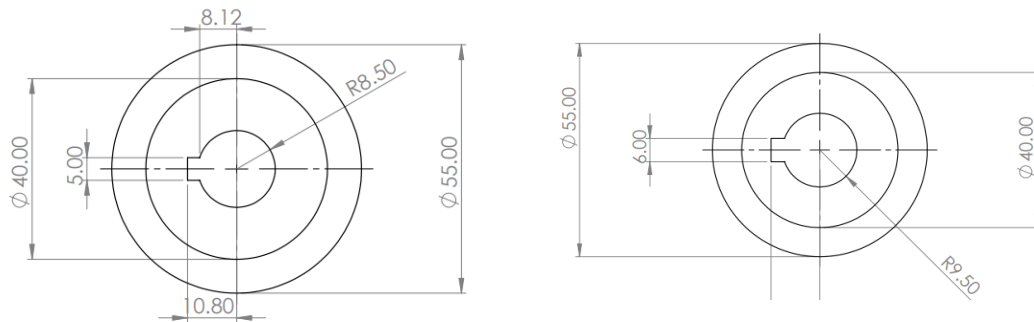


Figure 3.8 : Le plan des deux parties de l'accouplement.

7.3 La vis à billes :

Une vis à billes est un mécanisme assurant la conversion d'un mouvement de rotation en un mouvement de translation . C'est un équivalent du mécanisme de vis-écrou, où des billes sont intercalées entre les deux pièces pour minimiser les frottements.

La présence des billes permet de diminuer fortement le frottement qu'on rencontre dans un système vis-écrou simple. Les vis à billes s'imposent donc dans les cas :

- De transmission de puissance.
- De mouvements de précision, le remplacement du frottement par le roulement amenant la quasi-disparition de l'usure des surfaces, et donc des jeux (mécanique).
- Où on recherche une réversibilité de la conversion rotation / translation

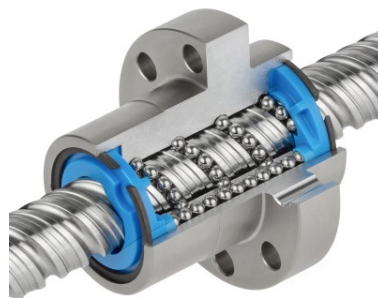


Figure 3.9 : Image descriptive du principe de fonctionnement d'une vis à billes avec noix à bille.

Dans notre machine, si le moteur tourne, il entraîne la rotation de l'accouplement, qui à son tour entraîne la rotation de la vis. L'écrou ou noix à billes qui est montée sur la vis (comme indiqué sur la figure précédente) se déplace et suit un mouvement de translation.



Figure 3.10 : écrou à vis à billes.

On dispose dans notre département d'une vis à billes d'un diamètre de 20 mm et d'une longueur de 2 m, nous avons coupé une partie de la vis et l'avons usiné pour qu'elle puisse être placée dans le roulement d'un côté et dans l'accouplement de l'autre côté.

Pendant l'usinage de la vis, nous avons réussi à obtenir le diamètre de 17 mm de premier côté, et 16 mm de deuxième côté (coté butée à billes), mais comme la vis est fabriquée en matériau dur pour qu'elle résiste aux différentes contraintes durant son mouvement, nous n'avons pas pu faire la rainure de clavette comme nous le souhaitions. Nous avons donc changé le système de transmission du mouvement, et nous avons percé la partie accouplement de la vis et nous avons fixé une vis de blocage après avoir créé une partie plate à l'extrémité de la vis qui sera montée sur la partie accouplement de la vis.

III-8 CONCLUSION

Grâce à ce chapitre, on peut en déduire que le procédé d'usinage des pièces est une étape cruciale qui semble simple, mais en vérité pas autant que ça. Afin de réussir cette étape, il suffit de prendre des précautions et se mettre à l'évidence du cas réel et non pas idéal, en l'occurrence les logiciels de conception (SOLIDWORKS... Etc).

Pour ce faire, il faut :

- Mettre en compte la disponibilité des machines nécessaires pour la réalisation des pièces dans le parc machine.
- Établir les gammes d'usinage qui sont appropriées à cette disponibilité.
- Optimiser le temps nécessaire pour la réalisation de chaque pièce afin de gagner du temps.
- Calculer avec haute précision les côtes des pièces dans le but de minimiser les pertes de matière pour l'entreprise.
- Effectuer des montages à blancs pour rectifier les erreurs imprévues par l'opérateur sur le champ.

En suivant ces étapes, chaque pièce respectera les côtes voisines de la pièce montée auprès de cette dernière, ce qui aboutira à un procédé de montage sans failles. Le procédé de montage sera le prochain thème dans notre chapitre.

CHAPITRE IV

L'ASSEMBLAGE FINAL ET LE COÛT DE LA MACHINE

IV-1 INTRODUCTION :

Après avoir terminé le procédé d'usinage des pièces et en respectant les cotes mis sur des plans, nous montrons dans ce chapitre les étapes de montage permettant de constituer notre machine. Pour cela, il faudra suivre certaines règles de manière à ne pas endommager certaines pièces sensibles.

Une étude de coût est faite dans le but de déterminer le montant total de notre machine.

IV-2 PROCÉDURE DE MONTAGE ET PRÉCAUTIONS :

Dans cette partie, nous allons vous montrer les étapes d'assemblage.

2.1 Montage des étaux et leur face avec la base :

Nous allons tout d'abord commencer par monter les étaux en forme de L et leur face avec la base. L'assemblage est simple et se fait par l'intermédiaire de boulons M6. Les vis sont à tête cylindrique à six pans creux. La figure ci-dessous montre la forme finale :

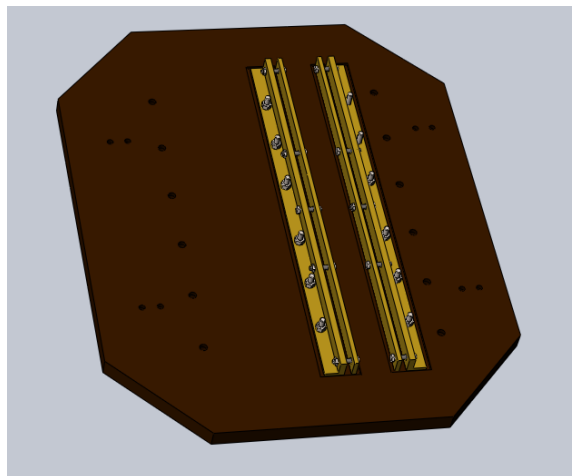


Figure 4.1 : Première étape de l'assemblage.

2.2 Montage de la première plaque de fixation avec la base :

Afin de monter la plaque de fixation, il suffit de la mettre verticalement dans le logement de la base. L'assemblage se fait avec des vis à tête cylindrique à six pans creux M10.

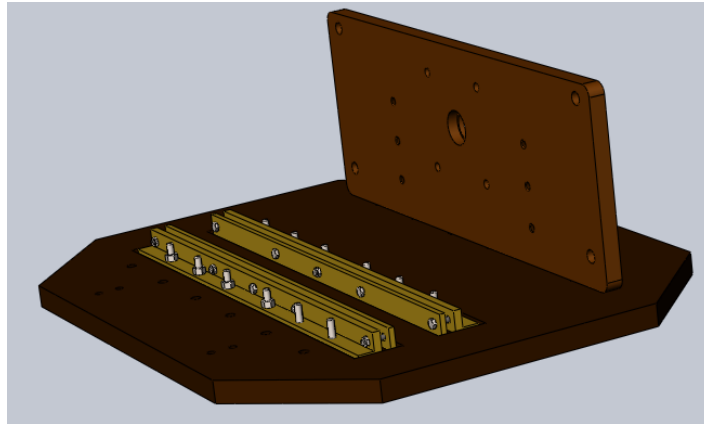


Figure 4.2 : Deuxième étape de l'assemblage.

2.3 Montage des nervures sur la première plaque de fixation :

Maintenant que la première plaque de fixation est mise en place, il faut fixer les nervures pour bien supporter les plaque, et ce, en les fixant sur la plaque et sur la base par des vis à tête hexagonale/cylindrique M8 :

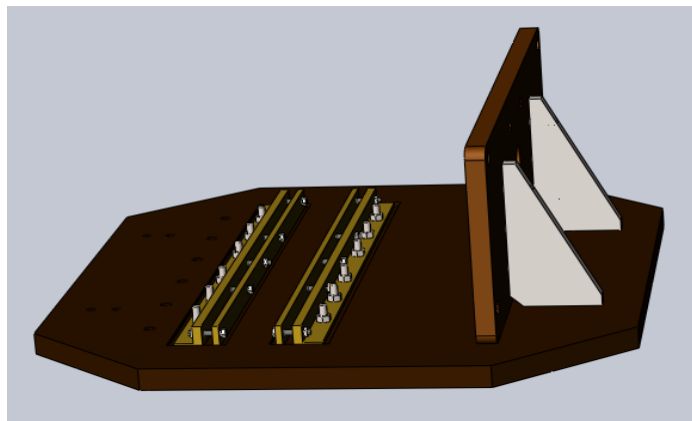


Figure 4.3 : Troisième étape de l'assemblage.

2.4 Montage du moteur :

Pour le moteur, on a opté pour un moteur pas à pas, afin d'obtenir une performance optimisée.

Ce dernier sera monté comme toutes les autres pièces à l'aide de vis à tête hexagonales M8.

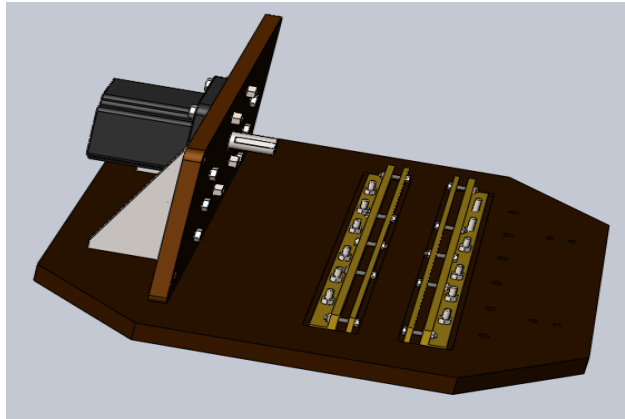


Figure 4.4 : Quatrième étape de l'assemblage.

2.5 Montage des tiges de guidage sur la plaque de fixation :

L'épaulement des tiges glissera directement sur les 04 trous dans les extrémités de la plaque de fixation puis seront bloquées par des vis et des rondelles.

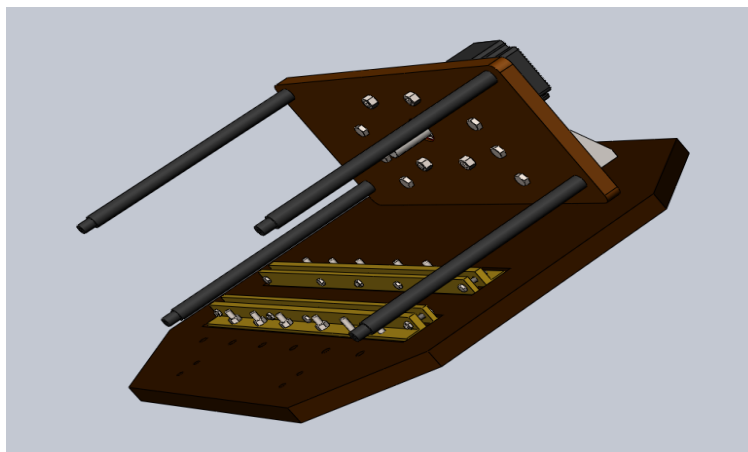


Figure 4.5 : Cinquième étape de l'assemblage.

2.6 Montage de l'accouplement avec le moteur :

Pour transmettre le mouvement de l'arbre du moteur pas à pas, celui-ci doit être monté avec un accouplement élastique. On monte tout d'abord la première partie de l'accouplement avec l'arbre du moteur.

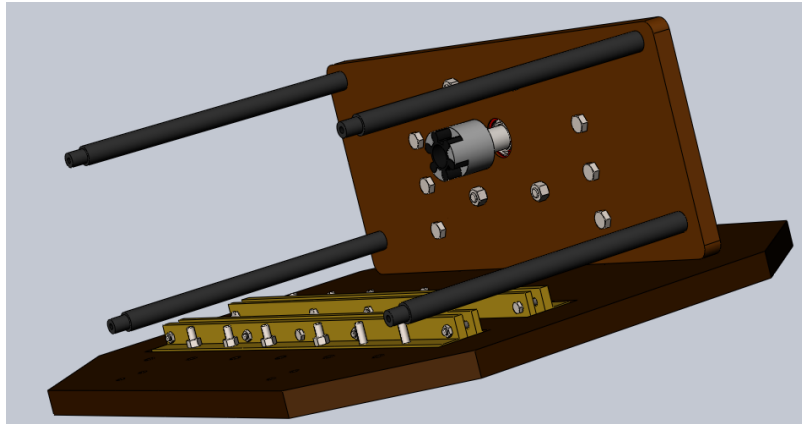


Figure 4.6 : Sixième étape de l'assemblage.

2.7 Fixation et montage du système de guidage :

Le système de guidage se compose de 5 pièces :

- Les plaques de guidage
- Les entretoises de guidage (avec coussinet en bronze)
- Les cales
- L'entretoise

Chacune de ces pièces sera montée avec l'autre pour former le système de guidage avant de commencer l'assemblage final.

- On commence tout d'abord par monter les bagues en bronze sur les entretoises de guidage (montage avec serrage) puis assembler l'ensemble sur les plaques de guidage (grâce à des vis à tête cylindrique M6).
- Ensuite, on assemble les cales sur les plaques de guidage avec boulons M6
- Pour finir l'assemblage, il faut que le mouvement des deux plaques de guidage soit synchronisé. Pour ce faire, on assemble les deux plaques de guidage ensemble avec l'entretoise et les deux entretoises de guidage et les bloque avec des vis, ensuite on assemble le tout sur les tiges de guidage tout en s'assurant du glissement du système sur ces dernières.

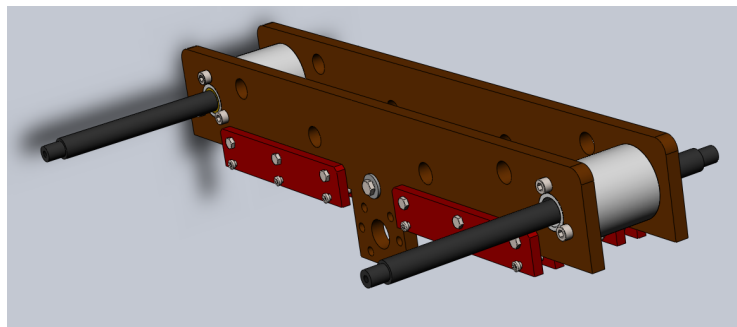


Figure 4.7 : Septième étape de l'assemblage.

2.8 Montage de la vis sans fin sur la bague à billes et montage du système de guidage :

Le montage de la vis à bille sera un processus complexe qui demande un peu de précision et de savoir-faire, et ce, pour ne pas abîmer l'écrou à billes :

- Tout d'abord, on commence par fixer l'écrou à billes sur la plaque de guidage qui lui est appropriée.
- Ensuite, on coupe le fil de l'écrou tout en glissant légèrement la vis sans fin dans cette dernière accompagné de la douille.
- Une fois la vis à bille engagée dans l'écrou, on l'accroche sur les deux extrémités (qui sont les plaques de fixation). Le point de départ de la vis sera assemblé à la deuxième partie de l'accouplement (suivi du flectore) qui à son tour est assemblé à l'arbre du moteur et le point d'arrivée qui est assemblé dans l'autre plaque de fixation où un roulement y est fixé.

La vis à billes est passée par un procédé de tournage (comme on l'a déjà précisé dans le chapitre 03) afin qu'elle puisse rentrer dans ses deux extrémités, comme cité dans la section précédente. A la fin de cette étape, la première butée à billes est montée avec serrage sur la vis.

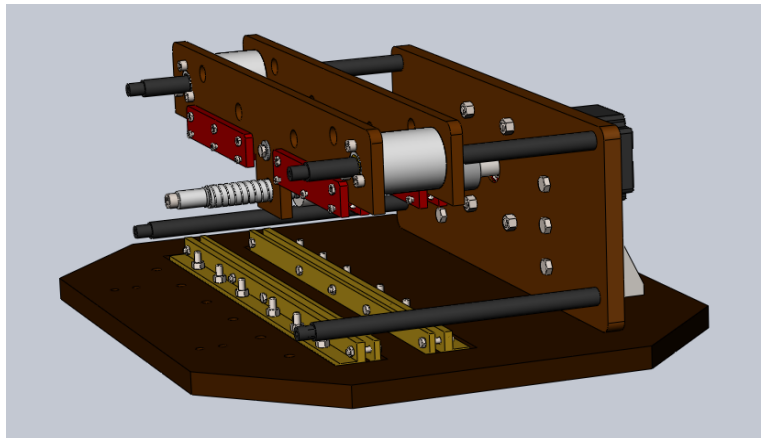


Figure 4.8 : Huitième étape de l'assemblage.

2.9 Montage de la deuxième plaque de fixation :

Au centre de la plaque de montage, nous avons déjà percé un trou pour la sortie de la vis. Nous commençons par monter, avec serrage, la première butée à billes sur la vis d'un côté, et sur la plaque de l'autre côté.

Pour monter la plaque de fixation sur la base de la machine, il suffit de la placer verticalement sur les trous de 11 mm de diamètre de la base, et de les assembler avec des vis à six pans creux M10.

Pour assurer la stabilité de la plaque et éviter les vibrations, nous avons fixé deux autres nervures identiques aux premières. Chaque nervure est fixée sur la plaque de fixation d'un côté et sur la base de l'autre côté.

Dans la partie de la vis qui sort de la plaque de fixation, nous montons la deuxième butée à billes, puis la bague de la vis, puis la rondelle et la vis M8.

Après avoir effectué ces étapes, la machine est prête à fonctionner, il nous reste seulement un montage à effectuer, celui des éprouvettes pour commencer à effectuer les tests de fatigue.

2.10 Montage des éprouvettes d'essais :

Notre machine permet des essais de fatigue en flexion plane sur 12 éprouvettes simultanément. Ces éprouvettes doivent être montées sur la machine.

Pour les monter, il suffit de mettre la partie inférieure des éprouvettes entre les étaux et de mettre la partie supérieure entre deux cales du système de guidage. Le serrage des éprouvettes se fait grâce à l'étau et des vis à tête hexagonale M6 dans la partie inférieure et des vis à extrémité pointue M5 sur la partie supérieure.

L'Assemblage final de la machine aura cette structure :

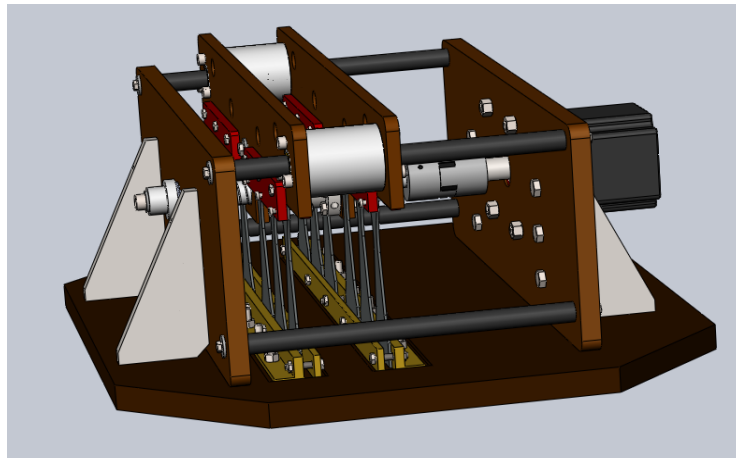


Figure 4.9 : Assemblage Final de la machine sur SOLIDWORKS

IV-3 ÉTUDE DE COÛT DE LA MACHINE :

Bien que les pièces de notre machine ont été usinées gratuitement au sein du complexe sidérurgique d'El Hadjar, nous avons quand même fait une étude de coût de chaque repère constitutif de la machine afin d'avoir un chiffre exact du prix total qu'un client aurait pu payer pour la réaliser (l'étude spécifique de chaque repère sera traitée dans les annexes) :

Tableau 4.1 : Coût total des pièces usinées

Repère	Prix total Majoré
Tiges de guidage	34 755.00 DA
Éprouvettes	24 975.00 DA
Étaux en forme L	16 020.00 DA
Face des étaux	14 255.00 DA
Plaque de guidage fin	18 455.00 DA
Plaque de guidage	19 043.00 DA
Plaque de fixation fin	19 561.25 DA
plaque de fixation	24 851.25 DA
la base	41 216.25 DA
Les entretoises	27 602.00 DA
Les cales	56 350.25 DA
Les nervures	36 955.00 DA
Les bagues	33 190.00 DA
COÛT TOTAL	367299.00 DA

Notre travail avec le complexe sidérurgique d'El-Hadjar nous a permis d'économiser la somme d'environ **370,000.00 dinars**. Bien évidemment, comme mentionné dans le dernier chapitre, nous avons aussi acheté des pièces pour notre machine.

Le tableau ci-dessous résume le prix payé des pièces achetées :

Tableau 4.2 : Coût total des pièces achetées

Pièces achetées	Prix
Accouplement	2080 DA
Vis sans fin	2500 DA
Bague à billes	8 000 DA
Roulements (2)	500 DA

Moteur	40 000 DA
Driver du moteur	30 000 DA
Arduino UNO	2200 DA
Ecran LCD	3000 DA
Transformateurs	10 000 DA
Potentiomètre	500 DA
L'armoire électrique	2 500.00 DA
COÛT TOTAL	100 200 DA

Le coût total de notre machine équivaut à la somme économisée des pièces usinées au sein du complexe sidérurgique d'El-Hadjar et chez USIPRECIS. Avec la somme des pièces achetées, le prix de revient de la machine est d'environ **470 000 DA**.

IV-4- CONCLUSION

De ce chapitre, nous pouvons déduire l'importance des étapes à suivre lors du montage des pièces constitutives d'une machine.

Si la succession des étapes n'est pas respectée, cela peut conduire certains problèmes indésirables tels que la déformation, le blocage de certaines pièces ou le dysfonctionnement de la machine.

Dans notre prochain chapitre, nous allons traiter l'aspect contrôle pour rendre le fonctionnement automatique de la machine et réaliser des essais cycliques.

CHAPITRE V

L'AUTOMATISATION DE LA MACHINE ET L'ESSAI DE VALIDATION

V-1 INTRODUCTION :

Après avoir finalisé toutes les étapes de montage et vérifié que la partie mécanique de notre machine fonctionne correctement, nous prenons en charge d'automatiser et d'assurer le bon contrôle de la machine. Dans ce chapitre, nous allons introduire les étapes et la procédure d'automatisation de notre machine, ainsi que la procédure d'utilisation de la machine.

V-2 L'AUTOMATISATION DE LA MACHINE :

Dans cette partie, nous présentons le moteur pas à pas adopté ainsi que l'équipement que nous avons utilisé pour contrôler ses battements afin de contrôler la flèche et la fréquence de rotation (ou nombre de cycles par minute). Un afficheur de nombre de cycles est nécessaire.

2.1 Le moteur pas-à-pas :

Le mouvement des plaques de guidage est assuré par une vis à billes qui transmet le mouvement de rotation créé par un moteur pas à pas et le convertit en un mouvement de translation. Ce type de moteur est très courant dans tous les dispositifs où l'on souhaite faire du contrôle de vitesse ou de position en boucle ouverte et typiquement dans les systèmes de positionnement et d'indexation.[15]

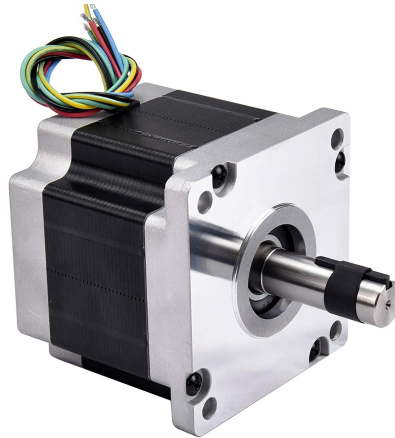


Figure 5.1 : Le moteur pas à pas utilisé.

Avantage :

- Bon rapport couple/précision/coût.
- Très facile d'utilisation si l'on souhaite contrôler un moteur en position.
- Couple de maintien, le moteur ne perd pas sa position, tant qu'on l'alimente.
- Précis si dimensionné correctement.

Désavantage :

- À haute vitesse le couple diminue

- Le moteur pas à pas a tendance à être plus volumineux que d'autres technologies de moteur.
- On le contrôle sous forme de pas, par incrément, il est possible de lisser le mouvement en le subdivisant en "micropas", mais en contrepartie, le couple fourni entre 2 micropas est réduit.
- Le moteur fonctionne en boucle ouverte, ainsi s'il est mal dimensionné et qu'il "saute un pas" (couple à fournir trop important) il est impossible de le détecter à moins d'utiliser un encodeur.
- Pour maintenir la position, le moteur doit être alimenté et donc consommer du courant. [16]

Notre moteur est de marque "JKONGMOTOR" et de type **JK110HS99-5504**, un moteur biphasé qui peut être alimenté avec un courant de 5,5A par phase, un angle de pas de $1,8^\circ$ et un couple de maintien égal à 11,2 N.m.[17]

Les dimensions de notre moteur sont schématisés dans la figure ci-dessous (les dimensions sont en mm :

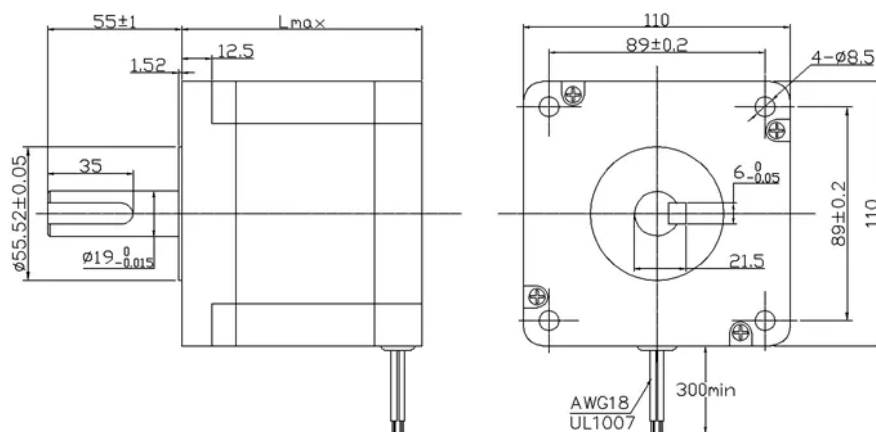


Figure 5.2 : Les dimensions de notre moteur pas à pas.

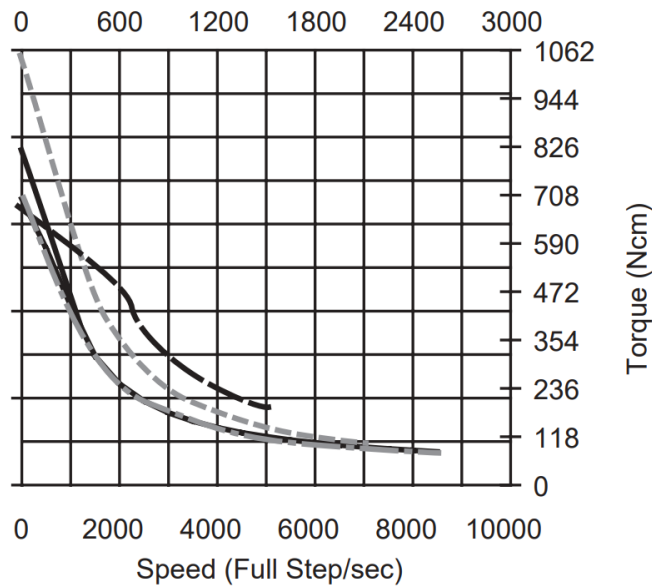


Figure 5.3 : Courbes de vitesse et de couple pour notre moteur pas à pas.

Nous remarquons que si la vitesse de rotation augmente, le couple diminue d'une façon exponentielle.

2.2 Le matériel utilisé pour le contrôle :

2.2.1 Le driver du moteur :

Un Driver de moteur pas à pas est le circuit de commande qui permet au moteur pas à pas de fonctionner. Il peut se diviser en 2 fonctions : l'alimentation du moteur avec ses contraintes de tensions, courants et puissances à dissiper ainsi que la protection contre les surtensions et les surintensités. C'est l'électronique de puissance.[18]



Figure 5.4 : Driver du moteur pas à pas.

Le driver que nous allons utiliser est de référence **MA860**, Le MA860 est un driver micro-pas économique basé sur la technologie brevetée d'EDRIVE. Il convient au pilotage de moteurs

pas à pas hybrides biphasés et quadriphasés. En utilisant la technique avancée de découpage bipolaire à courant constant, il peut produire plus de vitesse et de couple à partir du même moteur, par rapport aux pilotes traditionnels, tels que les pilotes L/R. Sa technologie de contrôle du courant à 3 états permet de bien contrôler les courants de bobine avec une ondulation de courant relativement faible, ce qui permet de réduire l'échauffement du moteur.[19]

2.2.2 Le microcontrôleur ARDUINO :

Un microcontrôleur est un petit processeur informatique relié à des entrées et des sorties numériques (0 ou 1) ou analogiques (tension variable). Il est capable de mémoriser et d'exécuter un programme visant à interpréter les entrées pour agir sur les sorties.[20]

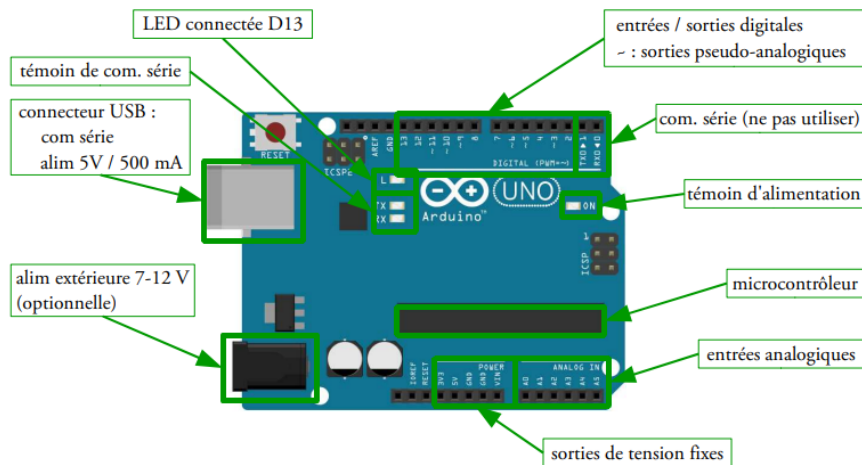


Figure 5.5 : Microcontrôleur Arduino [21]

Nous avons utilisé un microcontrôleur Arduino pour exécuter le programme afin de contrôler les battements du moteur pas à pas.

2.2.3 Transformateur électrique :

Un transformateur électrique est une machine électrique permettant de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement.[22]

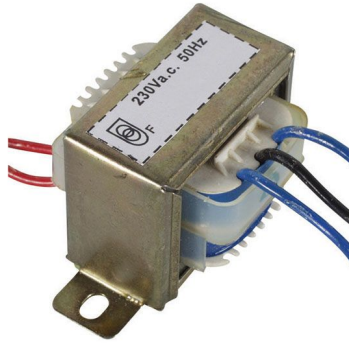


Figure 5.6 : Transformateur chassis ouvert 9va 2 x 9v 500ma

Pour notre système, nous avons utilisé deux transformateurs pour diminuer la tension de 220v à 48v pour alimenter le driver et un autre de 220v à 5v pour alimenter l'arduino au moyen d'un redresseur.

2.2.4 Le redresseur :

Un redresseur, également appelé convertisseur alternatif/continu ou pont de Graetz, est un convertisseur destiné à alimenter une charge qui nécessite de l'être par une tension et un courant tous deux les plus continus possibles, à partir d'une source de tension alternative. L'alimentation est, la plupart du temps, un générateur de tension.[23]

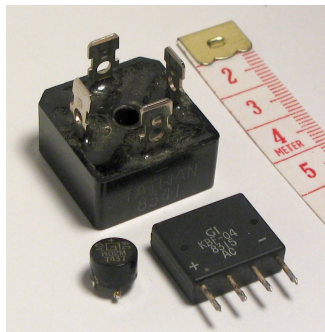


Figure 5.7 : Circuit redresseur

Nous avons utilisé un redresseur pour convertir le courant alternatif à la sortie du transformateur 220v/5v en courant continu pour alimenter l'ARDUINO.

2.2.5 Afficheur LCD :

L'afficheur LCD est en particulier une interface visuelle entre un système (projet) et l'homme (utilisateur). Son rôle est de transmettre les informations utiles d'un système à un utilisateur. Il affichera donc des données susceptibles d'être exploitées par l'utilisateur d'un système.[24]

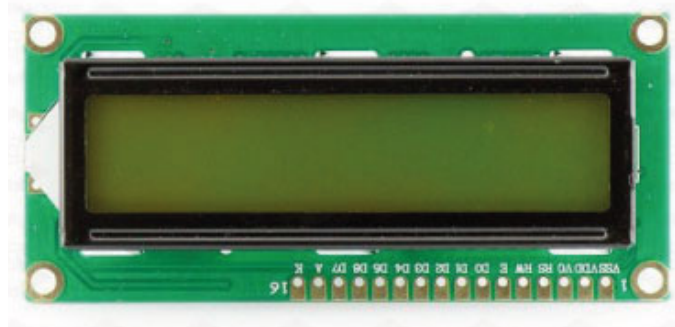


Figure 5.8 : Afficheur LCD 16X2

Nous avons utilisé un écran LCD pour lancer la machine et afficher la fréquence et le déplacement possibles.

2.2.6 Potentiomètre :

Un potentiomètre est un type de résistance variable à trois bornes, dont une est reliée à un curseur se déplaçant sur une piste résistante terminée par les deux autres bornes. Ce système permet de recueillir, entre la borne reliée au curseur et une des deux autres bornes, une tension qui dépend de la position du curseur et de la tension à laquelle est soumise la résistance.[25]



Figure 5.9 : Un potentiomètre rotatif standard.

Nous avons utilisé le potentiomètre et les boutons pour démarrer la machine, la mettre en position zéro, et aussi pour choisir les valeurs de la fréquence de rotation ainsi que la flèche souhaitée pour réaliser les essais de fatigue sur les éprouvettes.

2.2.7 Bouton poussoir (BP)

Les boutons sont généralement fabriqués à partir de matériaux durs, habituellement en plastique ou en métal, mais peuvent également être constitués de caoutchouc. On distingue deux types de boutons : le bouton normalement ouvert et celui normalement fermé (contact repos (CR) ou contact travail (CT)).[26]



Figure 5.10 : Bouton poussoir pour l'Arduino.

Nous avons utilisé deux boutons poussoir pour lancer et arrêter la machine (suivant et arrêter).

V-3 Le schéma électrique :

Le schéma électrique qui résume le montage adéquat des composants pour assurer l'automatisation du moteur pas à pas est présenté dans la figure suivante :

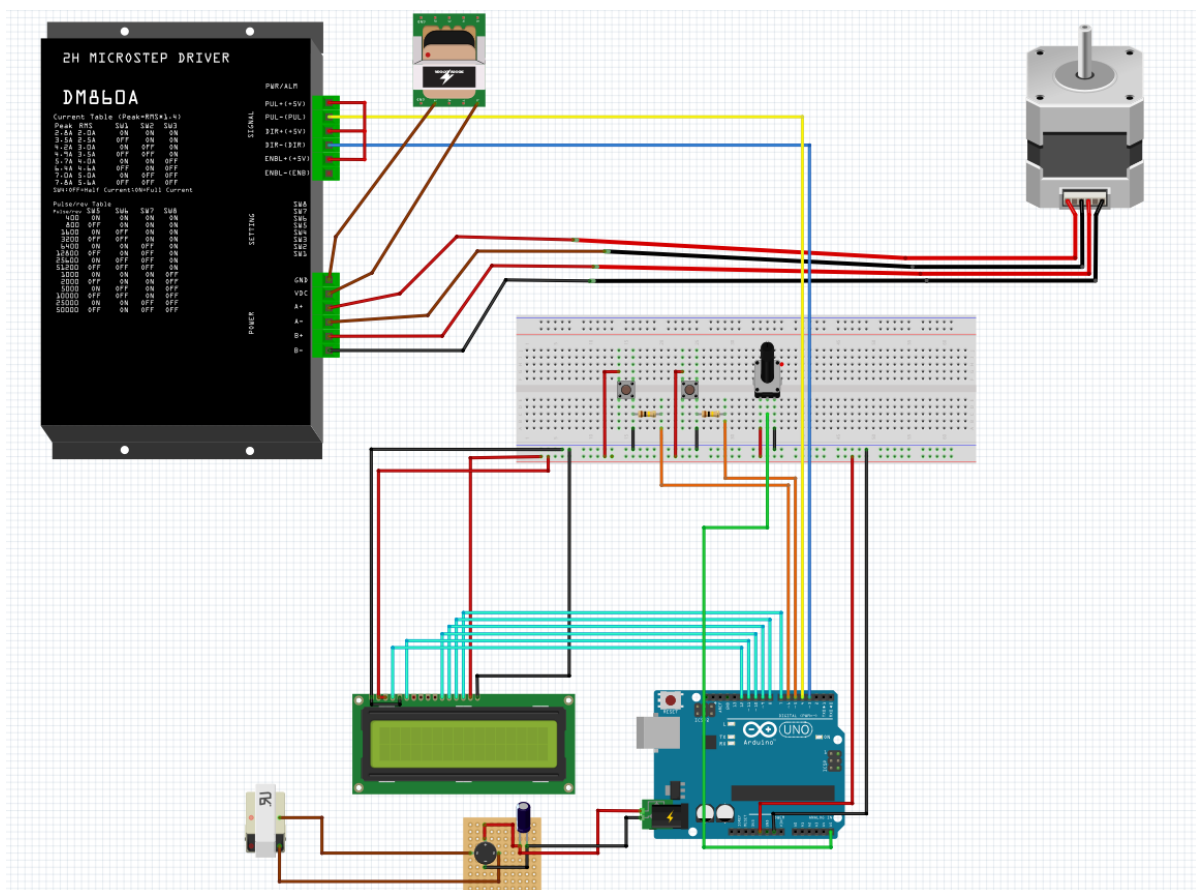


Figure 5.11 : Le schéma électrique du montage.

V-4 LE DÉMARRAGE ET LA VALIDATION DE LA MACHINE :

Après avoir effectué le montage et implémenté le code sur l'ARDUINO, on passe au démarrage de la machine. L'écran LCD affiche " Machine d'essai de fatigue en flexion plane ". Après quelques secondes, il affiche " Pour commencer, réglez le potentiomètre au maximum ". Dès que vous avez terminé cette étape, il affiche " Ajustez par les deux boutons ", et il faut mettre la machine en position zéro par les deux boutons de l'Arduino.

Pour passer à l'étape suivante, après la mise à zéro de la machine, la position où toutes les éprouvettes sont au repos, nous devons mettre le potentiomètre à zéro.

Dans cette étape, nous pouvons choisir la fréquence de rotation du moteur, qui est limitée dans une plage comprise entre [0 ; 30] cycles par minute, ainsi que la flèche souhaitée, qui est comprise entre [0 ; 10] mm. Une fois le choix effectué, on clique sur "suivant". L'expérience a montré que si nous choisissons les valeurs limites (30 cycles par minute et 10 mm de flèche), le moteur et le driver chauffent plus. Il est donc préférable d'éviter ce choix.

Si l'une des éprouvettes se casse, vous pouvez cliquer sur " arrêter " pour mettre la machine en pause à la position zéro. Dès que l'éprouvette cassée est retirée, la machine peut être redémarrée pour terminer les tests des autres éprouvettes, tandis que l'écran LCD affiche le nombre de cycles effectués.

Le moteur que nous avons dans notre département et que nous avons présenté précédemment, génère un couple moyen. Nous avons préféré, en phase de tests préliminaires, utiliser des éprouvettes en plexiglas et observer la rupture.

Les photos suivantes sont prises après la fin des premiers tests de validation de la machine.

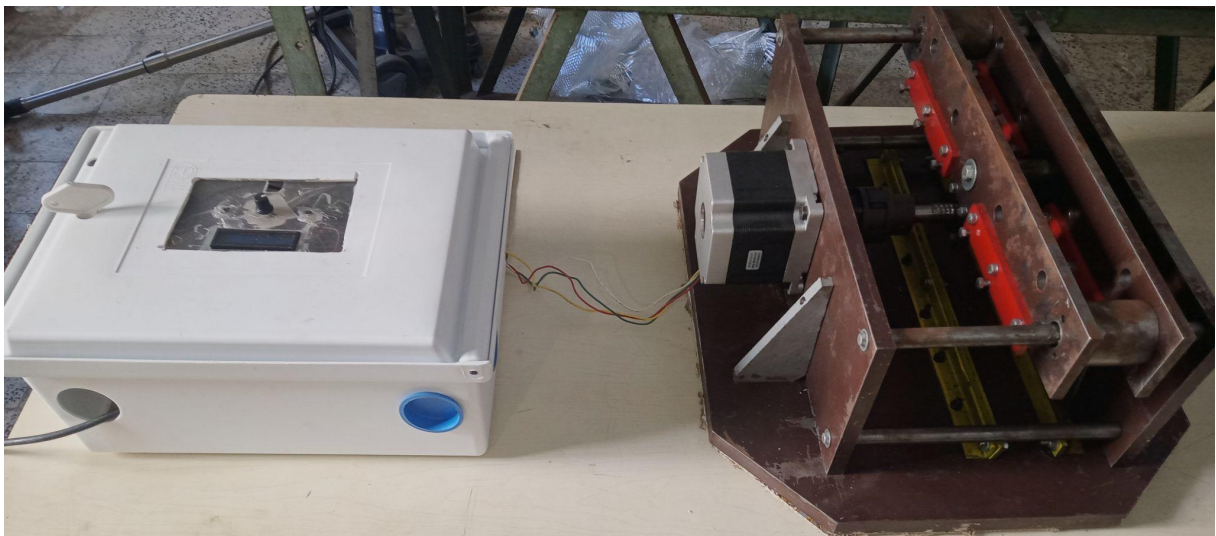
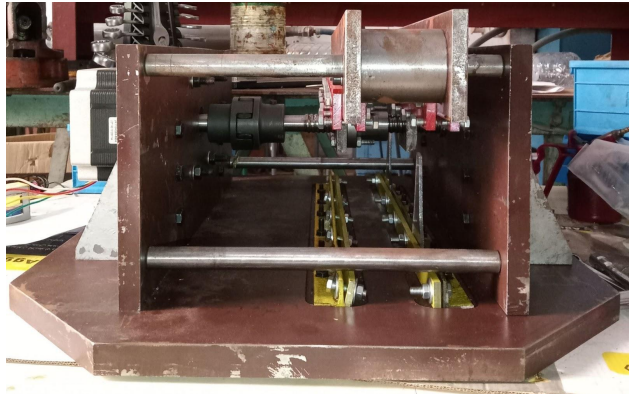
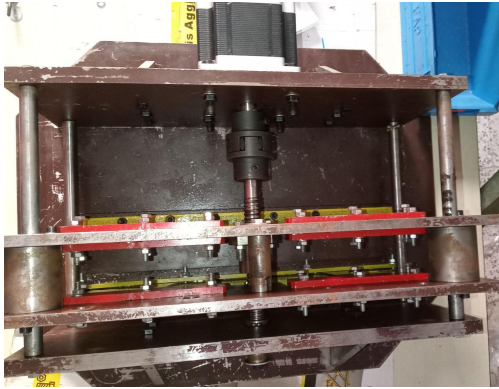


Figure 5.12 : Photos réelles de la machine après les premiers tests.

V-5 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons expliqué la procédure d'automatisation de notre machine, décrit les caractéristiques du moteur adopté ainsi que les composants utilisés pour réaliser un montage adéquat dans le but de contrôler le moteur pas à pas afin qu'il effectue des mouvements alternés avec une fréquence et une amplitude choisies par l'utilisateur et qui répondent à l'objectif de réaliser différents tests de fatigue.

Nous avons également expliqué la procédure d'utilisation de la machine et les étapes à suivre ainsi que les précautions d'usage pour assurer le meilleur fonctionnement de la machine.

La machine est compacte et silencieuse. Le moteur et le driver chauffent et le chargement doit être en conséquence. La machine permet de réaliser des tests sur plusieurs éprouvettes en même temps. Comme perspective, il faudra penser à un système d'arrêt automatique lors de rupture d'une éprouvette.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE :

Le phénomène de fatigue est l'une des principales causes qui peuvent engendrer le plus de dommages humains et matériels.

Nous avons appris que les matériaux ne sont pas seulement sollicités par des charges statiques, ces matériaux sont également soumis à des charges dynamiques ou cycliques qui conduiront à une défaillance après un certain nombre de cycles.

Dans ce projet, nous avons réalisé une machine d'essai de fatigue en flexion plane pour multi éprouvettes. Bien sûr, nous avons constaté que la conception est une étape primordiale, mais elle ne suffit pas à elle seule à anticiper toutes les imperfections que l'on peut rencontrer lors de la réalisation. Les problèmes auxquels nous avons dû faire face nous ont beaucoup appris en termes d'approche sur le processus de réalisation, et d'être rigoureux sur le moindre détail de la machine, car ce sont ces derniers qui mèneront finalement soit au fonctionnement, soit à l'échec.

Durant ces 3 mois de stage au sein du complexe sidérurgique d'El Hadjar, nous nous sommes mis dans la peau d'un ingénieur méthodes en rédigeant les gammes d'usinage des multiples marques constituant notre machine tout en effectuant un suivi durant toutes les étapes de fabrication afin de s'assurer que toutes les dimensions et les contraintes sont respectées. Nous avons, grâce à l'aide de M. ZEHANA gérant de la Sarl USIPRECIS, expérimenté le fait que le processus de montage n'est pas aussi simple qu'il n'y paraît et nécessite une rigueur et beaucoup d'expérience.

Une fois le montage effectué, nous avons avec l'aide de M. CHALAL, étudiant en 2^e année Automatique et de M. BOUSSOUSSOU, étudiant en 1^{re} année mécanique et passionné par l'électronique, réussi à automatiser la machine et à la rendre parfaitement fonctionnelle et simple à manipuler.

A partir des remarques constatées sur les machines réalisées au département dans le cadre de PFE précédents, la machine actuelle est:

- Plus compacte
- Silencieuse
- Parfaitement automatisée
- Sécurisée au niveau fonctionnel
- Facilement déplaçable
- Peut réaliser des essais de fatigue sur multi-éprovettes
- Grâce au contrôle du moteur pas à pas, la machine peut réaliser des essais de relaxation en imposant un déplacement fixé.

Comme perspectives et amélioration à apporter, nous proposons de :

- Simplifier le système de montage des éprouvettes.
- Concevoir un système d'alerte et d'arrêt automatique lors d'une rupture d'une éprouvette en cours d'essai.
- Penser à un montage de moteur asynchrone puissant pour des essais à fortes charges avec contrôle de cyclage et amplitude en utilisant le même accouplement.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[1]- Site web ELEMENT, “5 Disasters Caused by Material Fatigue and What We Learned From Them”, publié le 04/06/2022.

<https://www.element.com/nucleus/2016/5-disasters-caused-by-material-fatigue-and-what-we-learned-from-them>

[2]- BOUMARAF Intisar - NADIR Issam, “Etude et conception d’une machine de fatigue sous corrosion en flexion plane pour multi-éprouvettes”, soutenu en juin 2013, ENP.

[3]- Aymen BOUARADA, “Étude et Conception d’une machine automatisée et compacte pour des essais de fatigue en flexion plane”, soutenu le 16/09/2021, ENP.

[4]- Site web SIEMENS, “History of Fatigue”, publié le 29/08/2019.

<https://community.sw.siemens.com/s/article/history-of-fatigue>

[5]- David Roylance, “Fatigue”, P. 1, publié le 01/05/2001.

<https://web.mit.edu/course/3/3.11/www/modules/fatigue.pdf>

[6]- David Roylance, “Fatigue”, P. 2, publié le 01/05/2001.

<https://web.mit.edu/course/3/3.11/www/modules/fatigue.pdf>

[7]- Site web WIKIPEDIA, “Fatigue (matériau)”.

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Fatigue_\(mat%C3%A9riau\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fatigue_(mat%C3%A9riau))

[8]- Abdulkader Zalt, “Endommagement par fatigue et prédiction de la durée de vie des structures soudées de type caisson”, P. 13-14, Université de Lorraine, 2012.

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749316/document>

[9]- Site web WIKIPEDIA, “Limite d'endurance”.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Limite_d%27endurance

[10]- H.E. Boyer, “Atlas of Fatigue Curves” Fatigue Testing, P. 5, publié en 1986.

https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06156G_Sample.pdf

[11]- Site web zwickroell, “ZwickRoell votre partenaire pour les essais sur matériaux et composants”.

<https://www.zwickroell.com/fr/>

[12]- H.E. Boyer, “Atlas of Fatigue Curves” Fatigue Testing, P. 8-9, publié en 1986.

https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06156G_Sample.pdf

[13]- Site web WIKIPEDIA, “Arc-boutement”.

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Arc-boutement>

[14]- Site web Otello, “Acier XC48”.

<https://www.otelo.be/catalogue/acier-xc48/otmt-1507100253156-skg.html>

- [15]- Site web WIKIPEDIA, “Moteur pas à pas”.
https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_pas_%C3%A0_pas
- [16]- Kilian Sanfins, “Comment contrôler un moteur pas à pas”.
https://fablabutc.fr/wp-content/uploads/2021/01/Tutoriel_Moteur-pas-a-pas.pdf
- [17]- Site web ALIBABA, “Moteur pas à pas nema 42, 110mm, JK110HS99-5504 degrés”.
https://french.alibaba.com/p-detail/1.8deg-1600113410248.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.7ed871e3iY2Dcc
- [18]- Hervé Mazelin, “Driver motor”, publié le 19 avril 2016.
<https://www.redohm.fr/2016/04/hardward-driver-moteur-pas-a-pas/#:~:text=Un%20Driver%20Opilotant%20un%20moteur,est%20l'%C3%A9lectronique%20de%20puissance>
- [19]- Site web IMS, “Datasheet-MA860 Stepper Motor Driver”.
<https://www.ims.com.my/>
- [20]- Site web flossmanuals, “Microcontrôleur”.
<https://fr.flossmanuals.net/arduino/micro-controleur/#:~:text=Un%20micro%2Dcontr%C3%B4leur%20est%20un,pour%20agir%20sur%20les%20sorties>
- [21]- Frédéric Bouquet - Julien Bobroff, “MICROCONTROLEUR ARDUINO”, publié en 2015.
http://hebergement.u-psud.fr/projets/documents/poly_s4s5_arduino.pdf
- [22]- Site web WIKIPEDIA, “Transformateur”.
https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_%C3%A9lectrique
- [23]- Site web WIKIPEDIA, “Redresseur”.
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Redresseur>
- [24]- Site web plaisirarduino, “Afficheur LCD”.
<https://plaisirarduino.fr/afficheur-lcd-comment-lexploiter/#:~:text=L'afficheur%20LCD%20est%20en,'utilisateur%20d'un%20syst%C3%A8me>
- [25]- Site web WIKIPEDIA, “Potentiomètre”.
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Potentiom%C3%A8tre>
- [26]- Site web WIKIPEDIA, “Bouton Poussoir”.
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Bouton_\(%C3%A9lectricit%C3%A9\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bouton_(%C3%A9lectricit%C3%A9))

ANNEXES

ÉTUDE DE COÛT DE CHAQUE PIÈCE USINÉE :

Tableau : Coût des tiges de guidage

Repère 01 : Tiges de guidages			
Matière : XC48	Poids Total : 6.6 Kg	Nombre de pièces : 4	
Prix Matière : 718.00 DA	Prix Unitaire : 6951.00 DA	Prix Global : 27804.00 DA	Prix Global majoré : 34755.00 DA

Tableau : Coût des éprouvettes

Repère 02 : Éprouvette			
Matière : XC48	Poids Total : 2.2 Kg	Nombre de pièces : 2	
Prix Matière : 314.00 DA	Prix Unitaire : 1665.00 DA	Prix Global : 19980.00 DA	Prix Global majoré : 24975.00 DA

Tableau : Coût des étaux en forme L

Repère 03 : Etau en forme L			
Matière : XC48	Poids Total : 7 Kg	Nombre de pièces : 2	
Prix Matière : 706.00 DA	Prix Unitaire : 6408.00 DA	Prix Global : 12816.00 DA	Prix Global majoré : 16020.00 DA

Tableau : Coût des faces de l'étau

Repère 04 : Face de l'étau			
Matière : XC48	Poids Total : 2.2 Kg	Nombre de pièces : 2	
Prix Matière : 220.00 DA	Prix Unitaire : 5702.00 DA	Prix Global : 11404.00 DA	Prix Global majoré : 14255.00 DA

Tableau : Coût de la plaque de guidage de fin

Repère 5/1 : Plaque de guidage fin			
Matière : XC48	Poids Total : 12.2 Kg	Nombre de pièces : 1	
Prix Matière : 1224.00 DA	Prix Unitaire : 14772.00 DA	Prix Global :	Prix Global majoré : 18455.00

Tableau : Coût de la plaque de guidage

Repère 5/2 : Plaque de guidage			
Matière : XC48	Poids Total : 12.2 Kg	Nombre de pièces : 1	
Prix Matière : 1224.00 DA	Prix Unitaire : 15235.00 DA	Prix Global :	Prix Global majoré : 19043.00 DA

Tableau : Coût de la plaque de fixation de fin

Repère 5/3 : Plaque de fixation fin			
Matière : XC48	Poids Total : 17.7 Kg	Nombre de pièces : 1	
Prix Matière : 1177.00 DA	Prix Unitaire : 15649.00 DA	Prix Global :	Prix Global majoré : 19561.25 DA

Tableau : Coût de la plaque de fixation

Repère 5/4 : Plaque de fixation			
Matière : XC48	Poids Total : 17.7 Kg	Nombre de pièces : 1	
Prix Matière : 1570.00 DA	Prix Unitaire : 19881.00 DA	Prix Global :	Prix Global majoré : 24851.25 DA

Tableau : Coût de la base

Repère 5/5 : La base			
Matière : XC48	Poids Total : 58.8 Kg	Nombre de pièces : 1	
Phases	Temps Unitaire	Temps Total	
Prix Matière : 5887.00 DA	Prix Unitaire : 32973.00 DA	Prix Global :	Prix Global majoré : 41216.25 DA

Tableau : Coût des entretoises

Repère 6 : Entretoises			
Matière : XC48	Poids Total : 1.3 Kg	Nombre de pièces : 2	
Prix Matière : 143.00	Prix Unitaire : 11041.00 DA	Prix Global : 22082.00 DA	Prix Global majoré : 27602.00 DA

Tableau : Coût de cales

Repère 7 : Cales			
Matière : XC48	Poids Total : 2.6 Kg	Nombre de pièces : 8	
Prix Matière : 263.00	Prix Unitaire : 5635.00 DA	Prix Global : 45080.00 DA	Prix Global majoré : 56350.00 DA

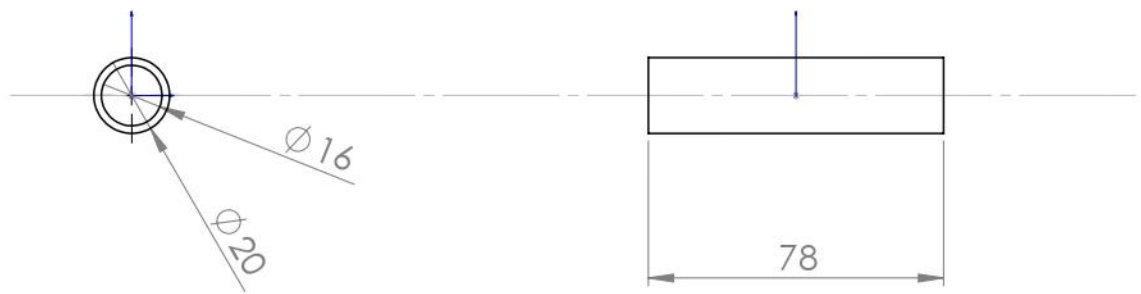
Tableau : Coût des Nervures

Repère 9 : Nervures			
Matière : XC48	Poids Total : 2.8 Kg	Nombre de pièces : 4	
Phases	Temps Unitaire	Temps Total	
Prix Matière : 628.00 DA	Prix Unitaire : 7391.00 DA	Prix Global : 29564.00	Prix Global majoré : 36955.00 DA

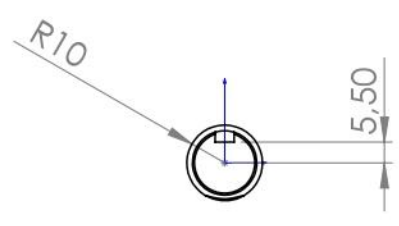
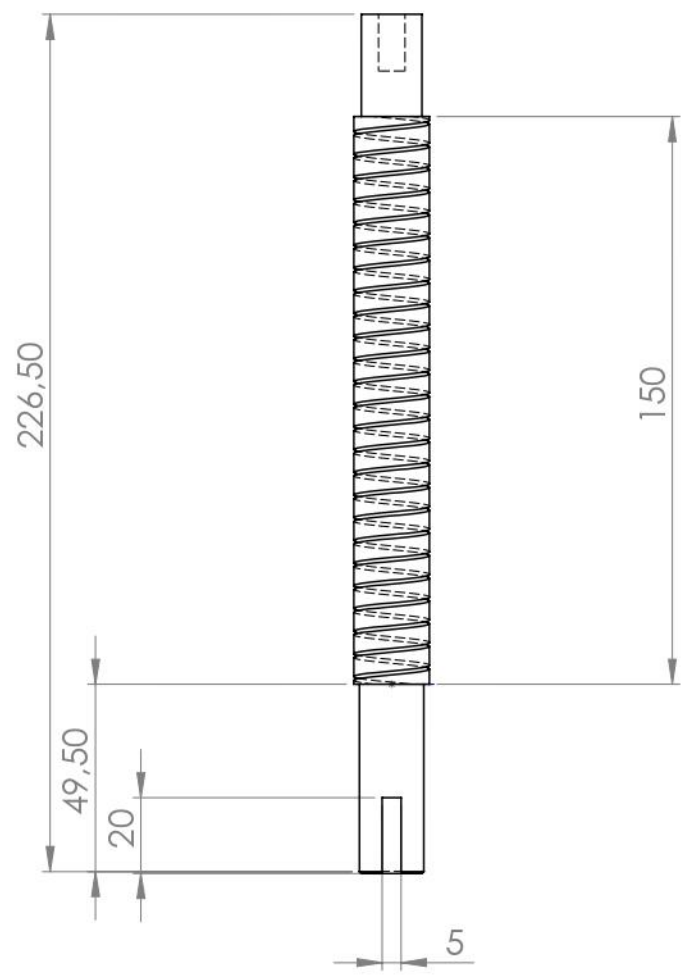
Tableau : Coût des Bagues

Repère 10 : Bague			
Matière : XC48	Poids Total : 2 Kg	Nombre de pièces : 4	
Phases	Temps Unitaire	Temps Total	
Prix Matière :	Prix Unitaire :	Prix Global :	Prix Global majoré :
1570.00 DA	6638.00 DA	26552.00 DA	33190.00 DA

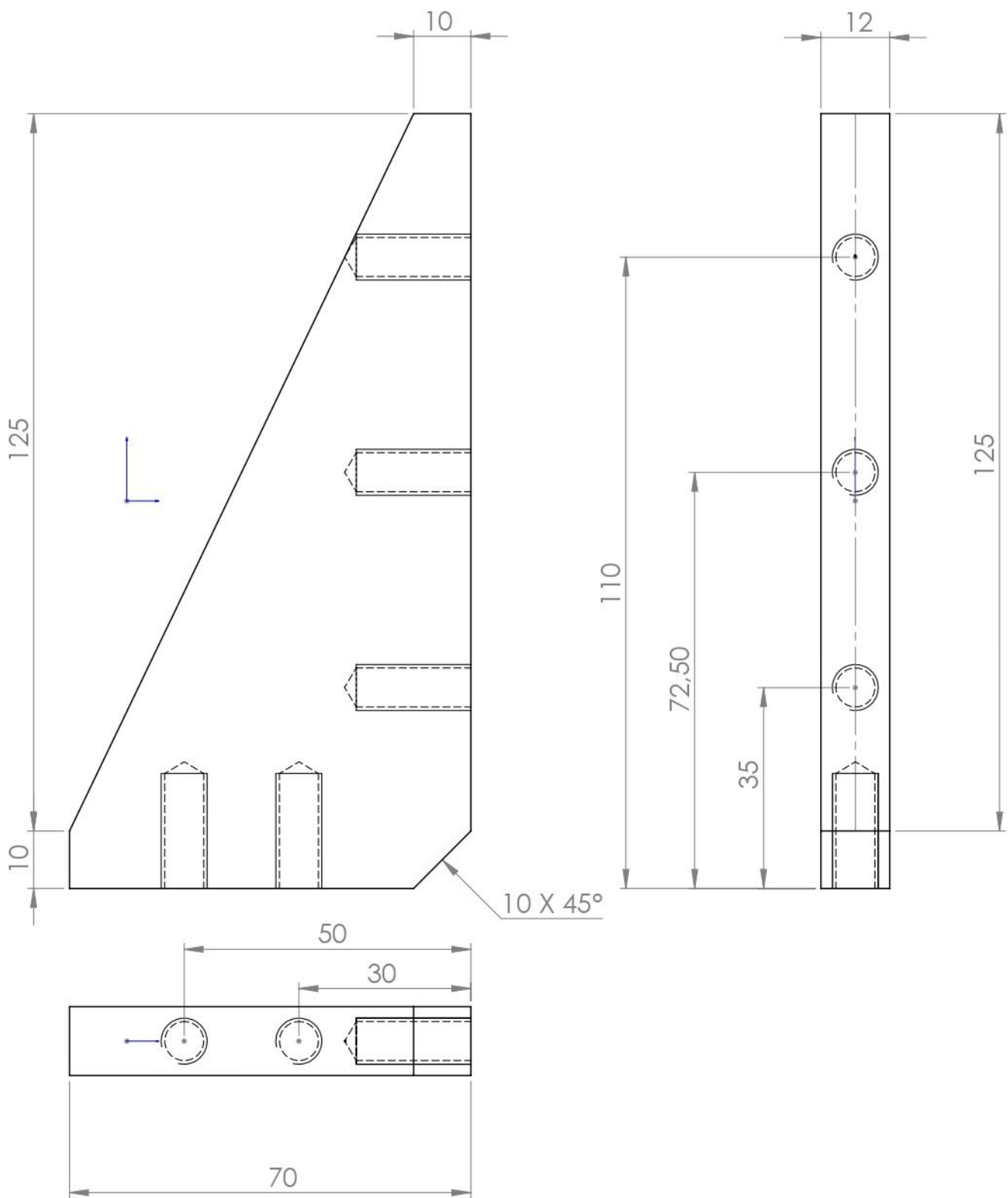
LES PLANS DE DÉFINITION DE CHAQUE PIÈCE :



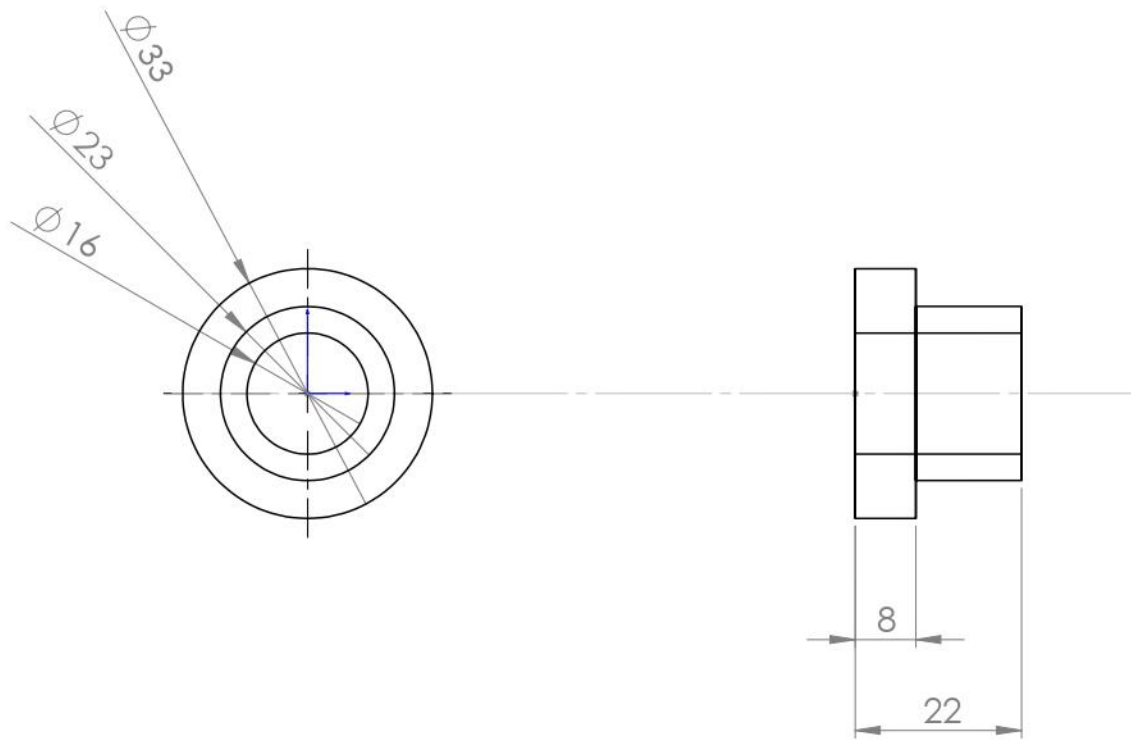
ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE		ALGER	
ECHELLE	1:2			Cousinet		ENP DEP MECANIQUE	
ETUDIANT	SAADANE						
ETUDIANT	TAHRAOUI						
PROMOTEUR	BELKACEMI						
PROMOTEUR	GUERGUEB						
MATERIAU	XC48			85		06/06/2022	



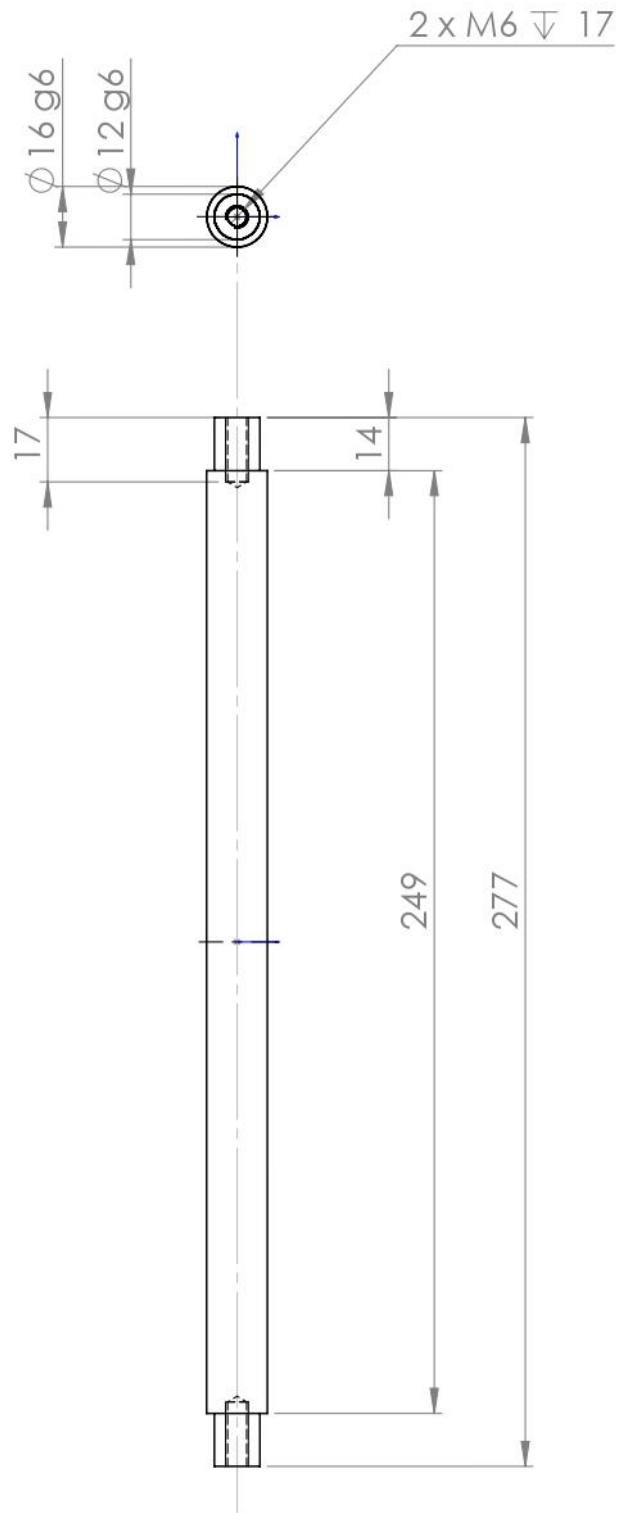
ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE		ALGER	
ECHELLE	1:2			Vis à billes		ENP DEP MECANIQUE	
ETUDIANT	SAADANE						
ETUDIANT	TAHRAOUI						
PROMOTEUR	BELKACEMI						
PROMOTEUR	GUERGUEB						
MATERIAU	XC48			86		06/06/2022	



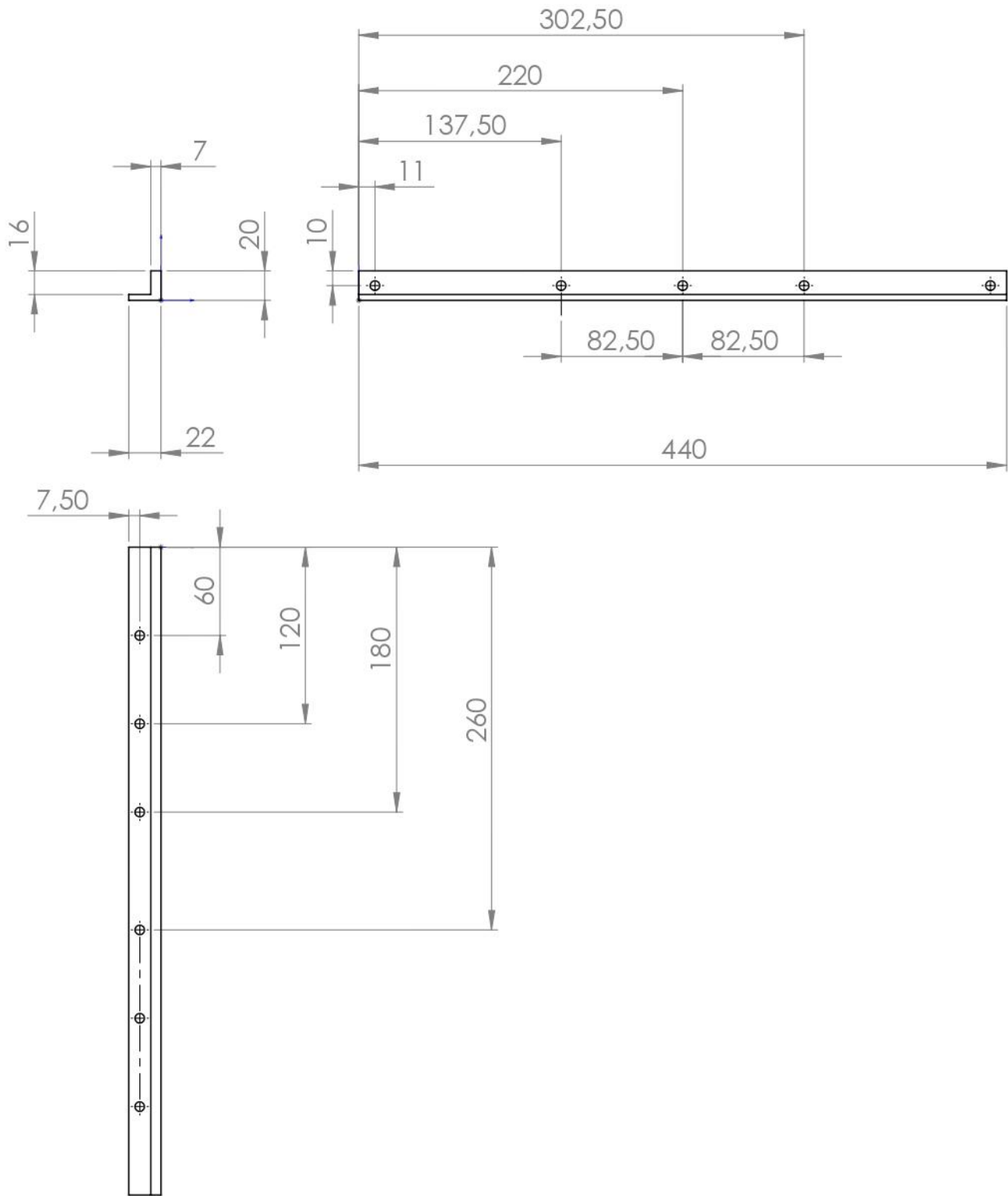
ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE		ALGER	
ECHELLE	1:1			Nervure		ENP DEP MECANIQUE	
ETUDIANT	SAADANE						
ETUDIANT	TAHRAOUI						
PROMOTEUR	BELKACEMI						
PROMOTEUR	GUERGUEB						
MATERIAU	XC48			87		06/06/2022	



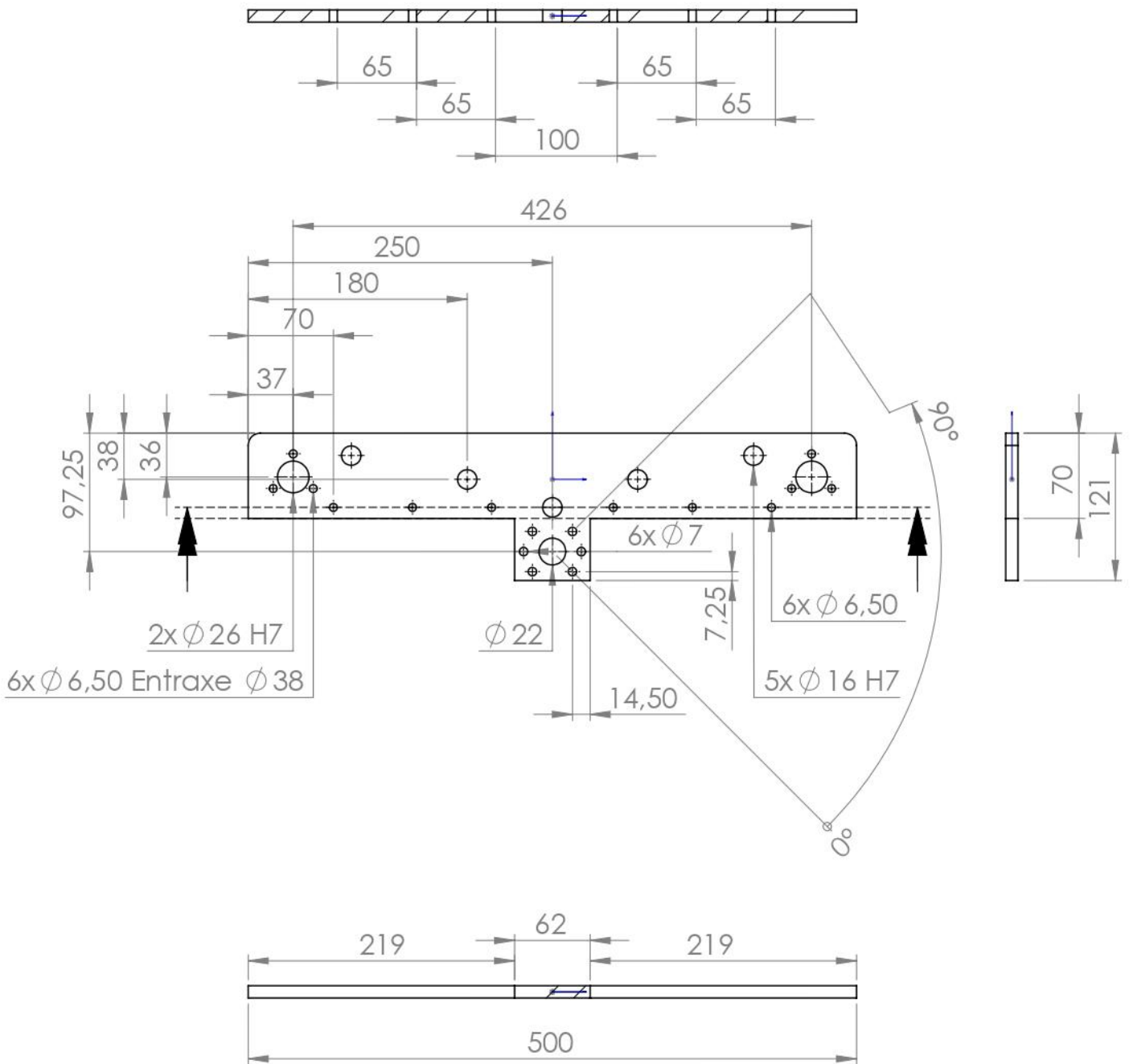
ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE		ALGER	
ECHELLE	1:1			Bague		ENP DEP MECANIQUE	
ETUDIANT	TAHRAOUI						
ETUDIANT	SAADANE						
PROMOTEUR	BELKACEMI						
PROMOTEUR	GUERGUEB						
MATERIAU	XC 48			88		06/06/2022	



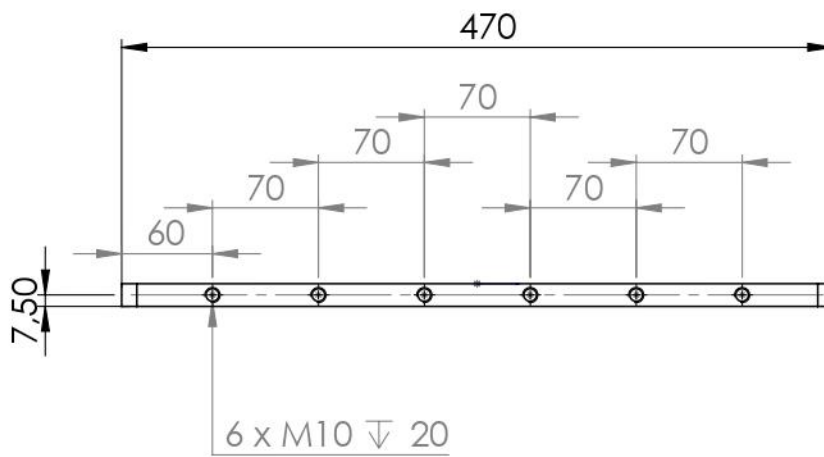
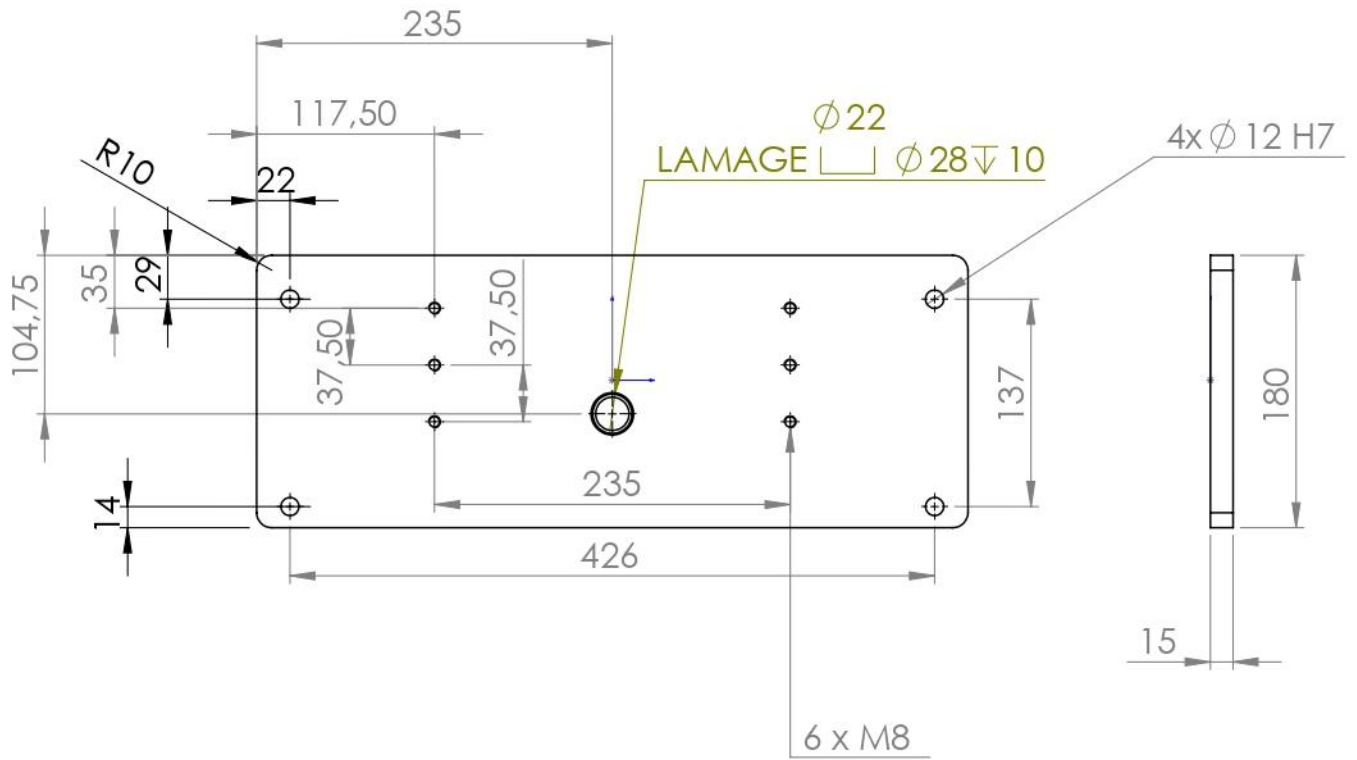
ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE		ALGER	
ECHELLE	1:2			Tige de guidage		ENP DEP MECANIQUE	
ETUDIANT	TAHRAOUI						
ETUDIANT	SAADANE						
PROMOTEUR	BELKACEMI						
PROMOTEUR	GUERGUEB						
MATERIAU	XC48			89		06/06/2022	



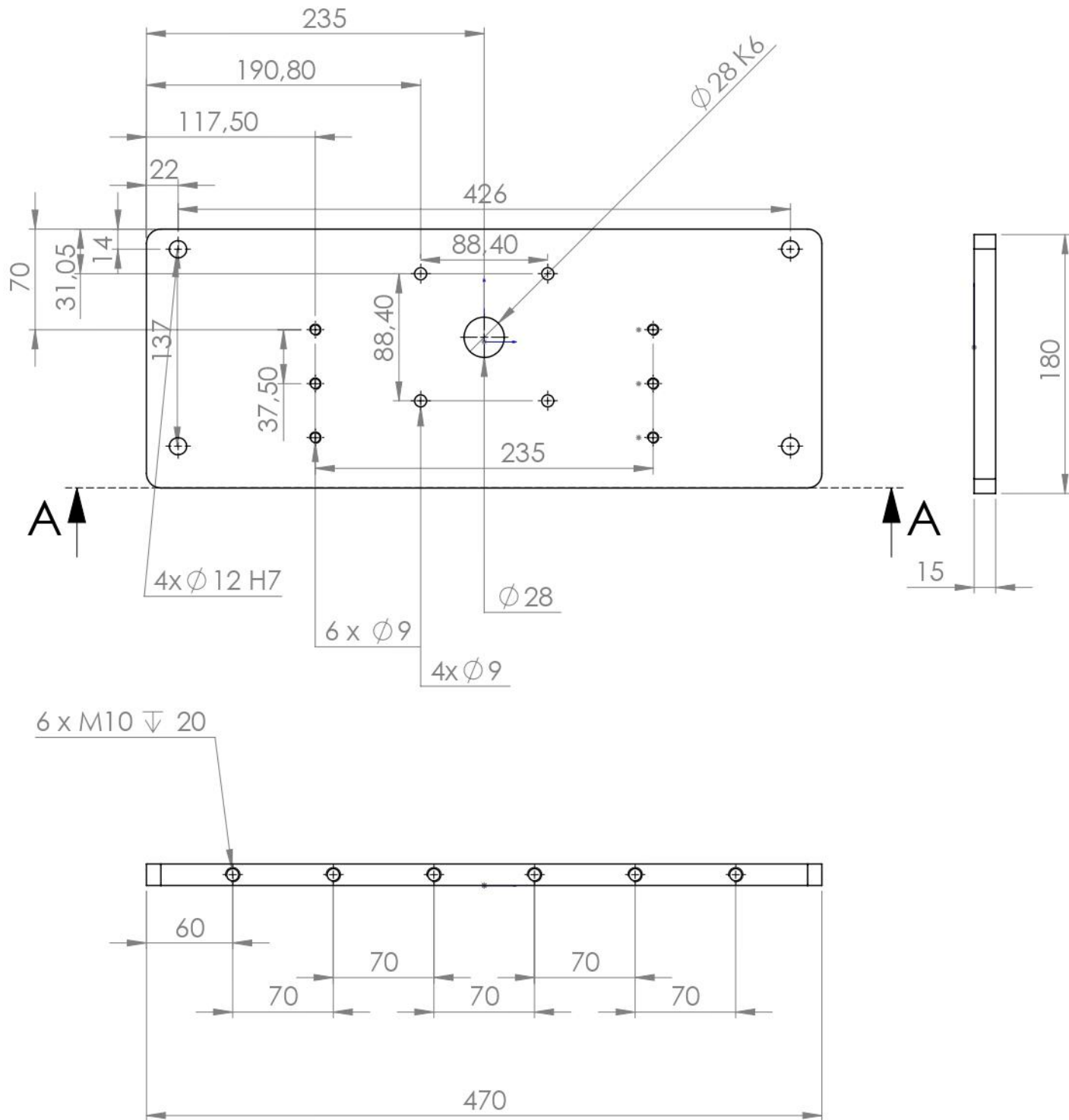
ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE		ALGER	
ECHELLE	1:4			Etau en L		ENP DEP MECANIQUE	
ETUDIANT	TAHRAOUI						
ETUDIANT	SAADANE						
PROMOTEUR	BELKACEMI						
PROMOTEUR	GUERGUEB						
MATERIAU	XC48			90		06/06/2022	



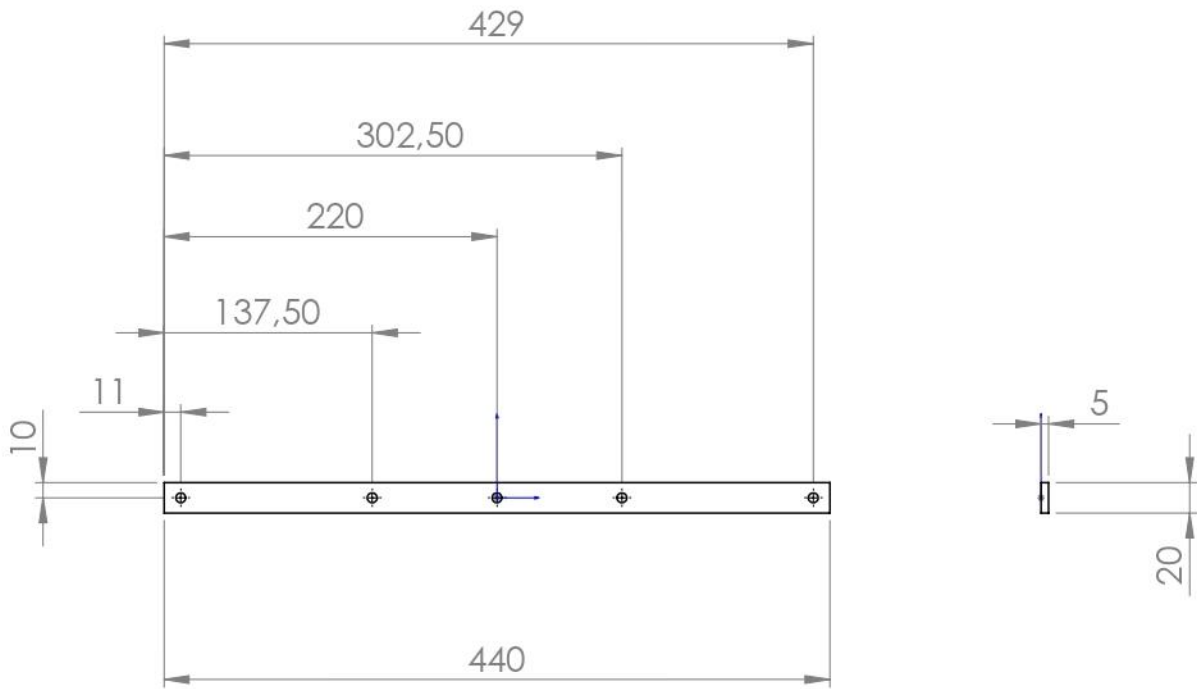
ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE		ALGER	
ECHELLE	1:5			Plaque de guidage		ENP DEP MECANIQUE	
ETUDIANT	TAHRAOUI						
ETUDIANT	SAADANE						
PROMOTEUR	BELKACEMI						
PROMOTEUR	GUERGUEB						
MATERIAU	XC48			92		06/06/2022	



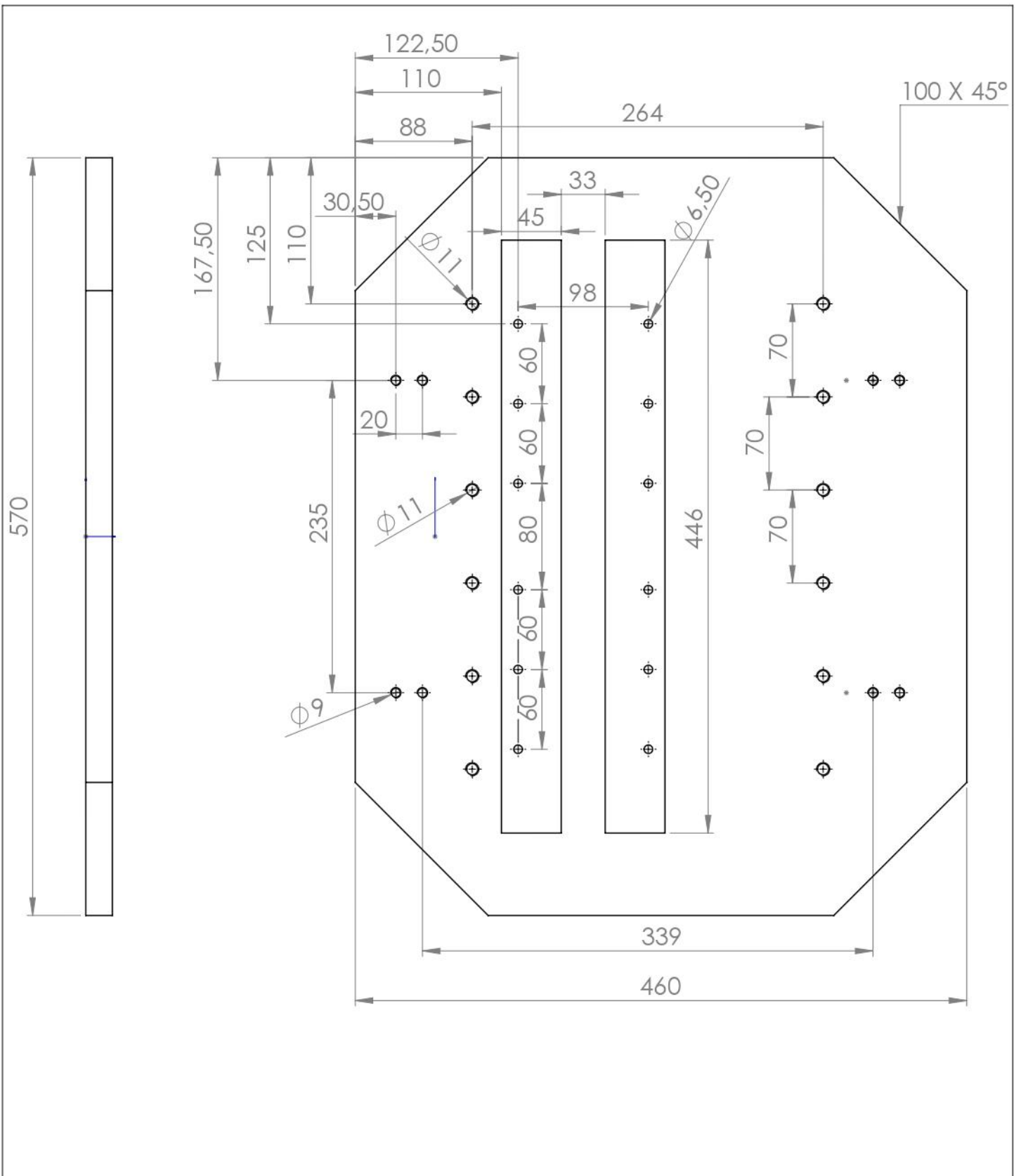
ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE		ALGER	
ECHELLE	1:5			Plaque de fixation fin		ENP DEP MECANIQUE	
ETUDIANT	TAHRAOUI						
ETUDIANT	SAADANE						
PROMOTEUR	BELKACEMI						
PROMOTEUR	GUERGUEB						
MATERIAU	XC48			93		06/06/2022	



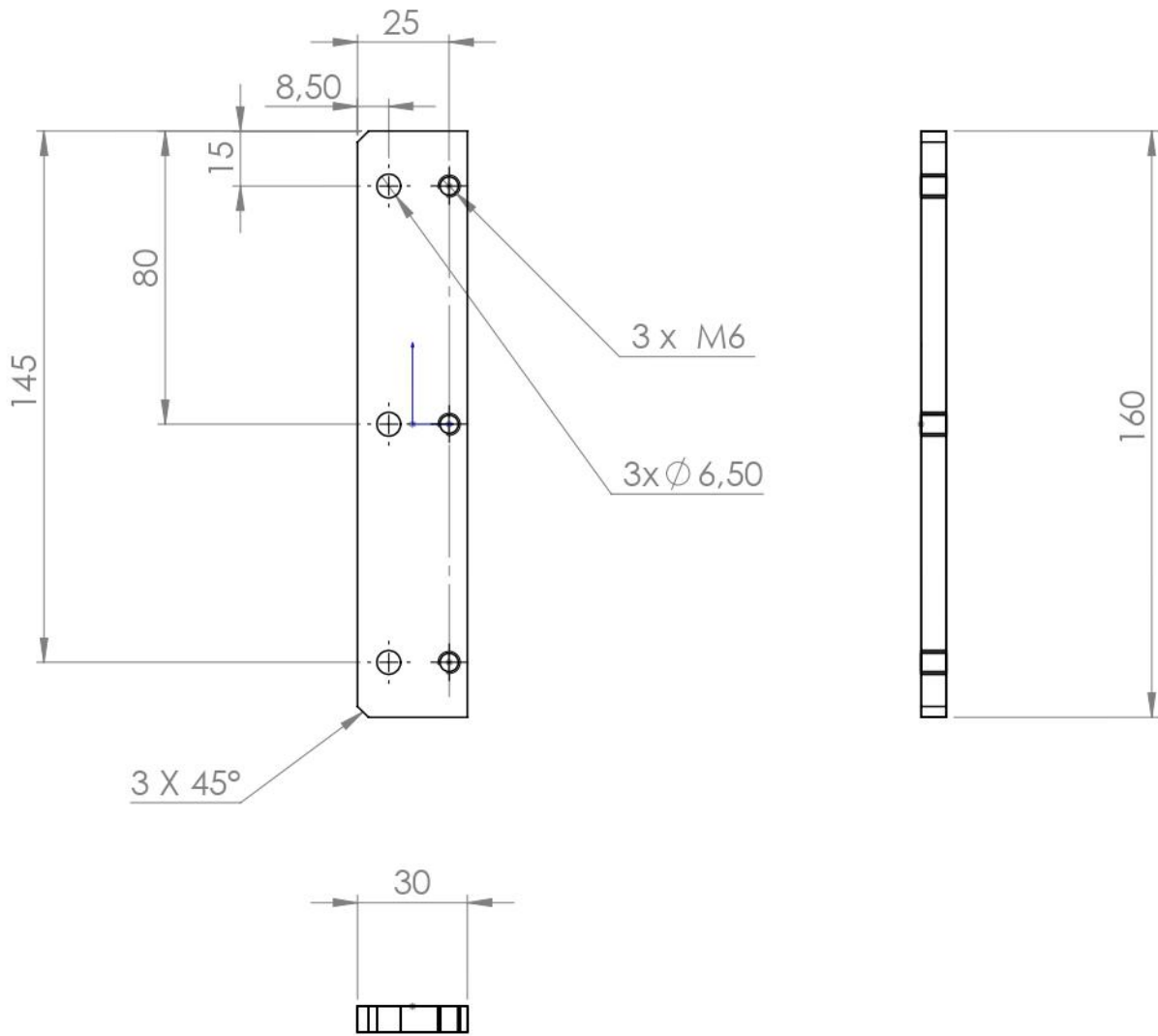
ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE		ALGER	
ECHELLE	1:4			Plaque de fixation		ENP DEP MECANIQUE	
ETUDIANT	TAHRAOUI						
ETUDIANT	SAADANE						
PROMOTEUR	BELKACEMI						
PROMOTEUR	GUERGUEB						
MATERIAU	XC48			94		06/06/2022	



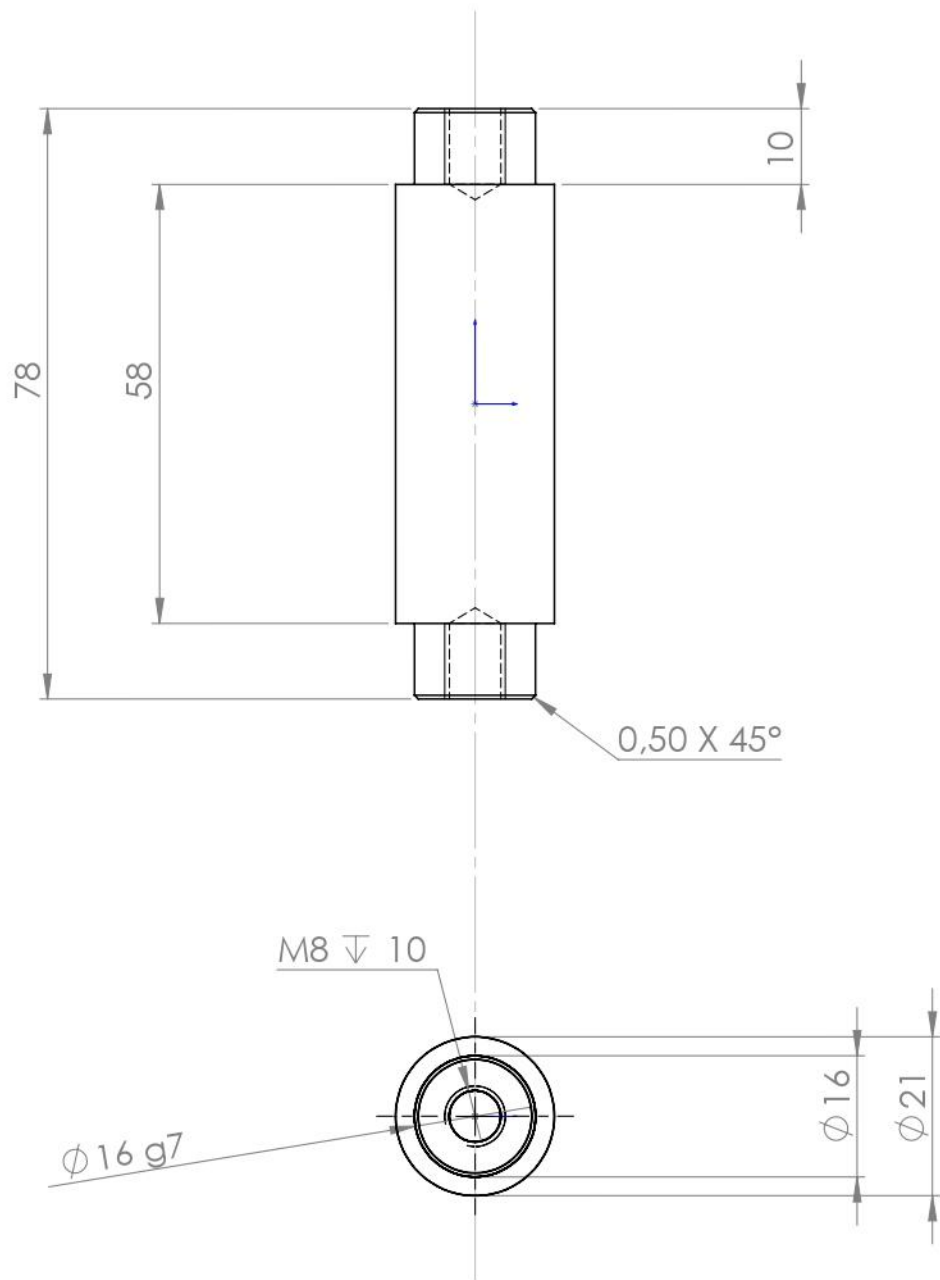
ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE		ALGER	
ECHELLE	1:5			Face de L'étai		ENP DEP MECANIQUE	
ETUDIANT	TAHRAOUI						
ETUDIANT	SAADANE						
PROMOTEUR	BELKACEMI						
PROMOTEUR	GUERGUEB						
MATERIAU	XC48			95		06/06/2022	



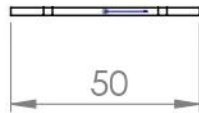
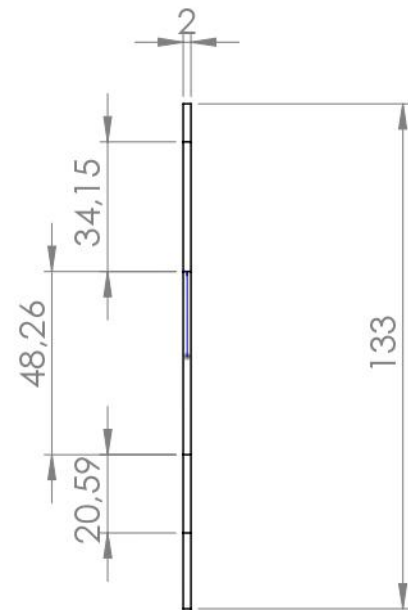
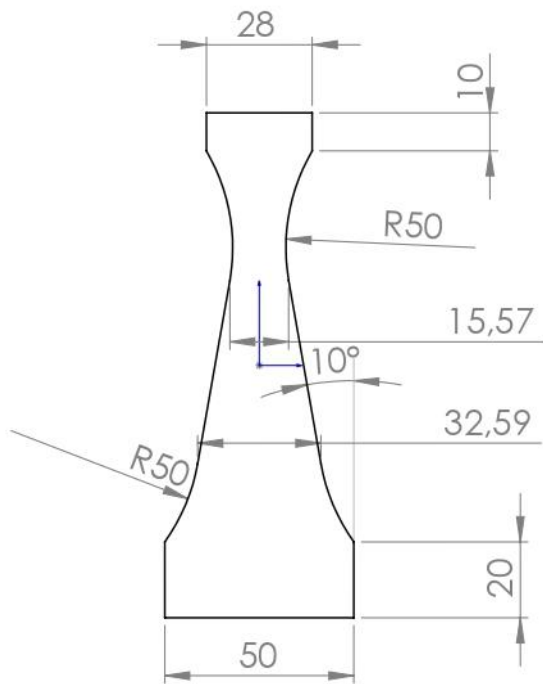
ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE		ALGER	
ECHELLE	1:4			La Base		ENP DEP MECANIQUE	
ETUDIANT	TAHRAOUI						
ETUDIANT	SAADANE						
PROMOTEUR	BELKACEMI						
PROMOTEUR	GUERGUEB						
MATERIAU	XC48			96		06/06/2022	



ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE		ALGER	
ECHELLE	1:2			Cale		ENP DEP MECANIQUE	
ETUDIANT	SAADANE						
ETUDIANT	TAHRAOUI						
PROMOTEUR	BELKACEMI						
PROMOTEUR	GUERGUEB						
MATERIAU	XC48			97		06/06/2022	



ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE		ALGER	
ECHELLE	1:1			Entretoises		ENP DEP MECANIQUE	
ETUDIANT	SAADANE						
ETUDIANT	TAHRAOUI						
PROMOTEUR	BELKACEMI						
PROMOTEUR	GUERGUEB						
MATERIAU	XC48			98		06/06/2022	



ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE		ALGER	
ECHELLE	1:2			Eprouvette		ENP DEP MECANIQUE	
ETUDIANT	TAHRAOUI						
ETUDIANT	SAADANE						
PROMOTEUR	BELKACEMI						
PROMOTEUR	GUERGUEB						
MATERIAU	XC48			99		06/06/2022	