

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Mécanique

Laboratoire de Génie Mécanique et de Développement

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

Conception et réalisation d'une machine de fatigue en flexion plane en
utilisant le phénomène électromagnétique

Réalisé par :

TOUAHRI Ramy

Sous la direction de :

Dr. Y. BELKACEMI

MA-A, ENP, Alger

Mr. B. GUERGUEB

MA-A, ENP, Alger

Présenté et soutenu publiquement le : 25/06/2016

Composition du Jury :

Président :	S. RECHAK	Professeur, ENP, Alger
Promoteur :	Y. BELKACEMI	MA-A, ENP, Alger
Promoteur :	B. GUERGUEB	MA-A, ENP, Alger
Examineur :	D. SAIDI	MA-A, ENP, Alger

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Mécanique

Laboratoire de Génie Mécanique et de Développement

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

Conception et réalisation d'une machine de fatigue en flexion plane en
utilisant le phénomène électromagnétique

Réalisé par :

TOUAHRI Ramy

Sous la direction de :

Dr. Y. BELKACEMI

MA-A, ENP, Alger

Mr. B. GUERGUEB

MA-A, ENP, Alger

Présenté et soutenu publiquement le : 25/06/2016

Composition du Jury :

Président :	S. RECHAK	Professeur, ENP, Alger
Promoteur :	Y. BELKACEMI	MA-A, ENP, Alger
Promoteur :	B. GUERGUEB	MA-A, ENP, Alger
Examineur :	D. SAIDI	MA-A, ENP, Alger

Dédicaces

Un projet d'études, contrairement à ce que pense la plupart des gens, n'est pas le résultat du travail d'une seule personne. C'est l'aboutissement d'efforts combinés, visant à surmonter un nombre d'embûches dont certaines sont d'ordre pédagogique, et d'autres liées aux lacunes que compte notre secteur de l'industrie.

De ce fait, une pensée de gratitude s'impose envers Dieu le tout puissant, sans qui rien ne pourrait être. Ainsi que tous ceux et celles qui ont permis à ce projet de voir le jour. Parce que sans eux, ce travail ne serait pas ce qu'il est aujourd'hui.

Je commencerai bien naturellement par mes parents qui ont cru en moi et en mes capacités tout au long de ces nombreuses années, même durant les temps les plus durs. Puisse Dieu les préserver et leur accorder santé, longue vie et bonheur, et les protéger de tout mal.

Je tiens aussi à remercier mes deux oncles (Moussa et Djamal) pour leur assistance et les précieux conseils apportés tout au long de l'élaboration de ce projet, et du fait qu'ils ont considéré ce projet comme si c'était le leur, faisant tout ce qui était en leur pouvoir pour le voir aboutir.

Je ne tarirai évidemment pas d'éloges pour mes promoteurs, Monsieur Y. Belkacemi et Monsieur B. Guergueb, pour m'avoir donné la responsabilité de réaliser ce projet, pour leur aide et leur suivi, ainsi que leur ponctualité et leur sérieux qui ont été des atouts majeurs dans l'avancement de ce travail. Je remercie le Prof. Said Rechak d'avoir accepté de présider le jury de cette soutenance et Mr. D. Saidi d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Sans oublier l'ensemble des travailleurs de l'atelier mécanique se trouvant à Souidania, l'atelier de bobinage électrique de Baba Ali ainsi que l'équipe de maintenance de SEAAL Garidi pour leur hospitalité et leur vive coopération, pour leur professionnalisme et le fait qu'ils ont adopté ce projet et ont fait tout leur possible pour finir les opérations avant le délai imparti. Je voudrais aussi remercier vivement Mr. Zahana Halim, chef d'entreprise (USIPRECIS) pour sa précieuse collaboration.

Ainsi que mes amis et mes camarades de la spécialité Génie Mécanique, tous les professeurs et les employés du département de Génie mécanique pour leur assistance durant ces trois années et qui ont fait, d'une manière ou d'une autre, que j'en sois arrivé à ce point.

Ce travail est le vôtre, j'espère qu'il sera à la hauteur de vos efforts et de vos attentes.

ملخص

يهدف هذا المشروع إلى تصميم آلة تعب انحناء. العديد من الآلات تستخدم أجهزة صاخبة. للتغلب على هذه المشكلة، تحقق هذا التصميم باستخدام سوليدوركس، يعتمد العمل المقترح على أجهزة تستخدم القوى الكهرومغناطيسية لإثارة العينات أو توليد تحريصات دورية يمكن استغلالها من قبل الاهتزازات.

كلمات مفتاحية: تصميم، آلة، اختبار، تعب، الإنحناء، القوى الكهرومغناطيسية، سوليدوركس.

Abstract

This work aims to design a plane bending fatigue testing machine. Many fatigues testing machines use noisy devices. To overcome this problem, the design was achieved using SolidWorks. The work is based on devices using electromagnetic forces to excite the samples or generate cyclic stresses that can be exploited within vibration.

Keywords: *design, fatigue testing machine, plane bending, electromagnetic forces, SolidWorks*

Résumé

Ce travail a pour but la conception et la réalisation de machine de fatigue en flexion plane. Beaucoup de machines de fatigues utilisent des dispositifs bruyants. Pour pallier à cet inconvénient, la conception a été réalisée en utilisant les logiciel SolidWorks. Le travail est basé sur des dispositifs utilisant les forces électromagnétiques pour exciter les éprouvettes et générer des sollicitations cycliques pouvant être exploitées en vibration. La conception.

Mots-clés : *conception, machine, fatigue, flexion plane, forces électromagnétiques, SolidWorks*

Table des matières

Liste des Figures	
Nomenclature	
Introduction générale.....	9
Chapitre 1 : Aspects théoriques relatifs à l'étude.....	11
1.1- Fatigue des matériaux et machines de fatigue	11
Introduction	11
1.1.1- Modes de chargement	12
1.1.2- Les essais de fatigue	15
1.2- Notion en magnétisme et magnétostatique	18
1.2.1- Le champ magnétique	18
1.2.2- La force de Laplace.....	20
Conclusion	23
Chapitre 2 : Méthodologie et conception.....	24
Introduction.....	24
2.2- Les éprouvettes de fatigue	24
2.3- Conception de la machine sous SOLIDWORKS	25
2.3.1- Modèle de la machine 1	26
2.3.2- Modèle de la machine 2	29
Chapitre 3 : Calculs relatifs à la conception et réalisation de la machine	33
3.1- Calculs relatifs à l'éprouvette	33
3.2- Calculs relatifs à la Machine 1	36
3.1.1- Calcul du nombre de spires et de la masse de la bobine	36
3.1.2- Calcul des dimensions du ressort à lames	38
3.3- Calculs relatifs à la machine 2	41
Nombre de spires de l'électroaimant	41

3.4- Description des machines	43
3.4.1- Description de la Machine 1.....	43
3.4.2- Description de la Machine 2.....	46
Conclusion générale	51
Bibliographie.....	53
ANNEXES.....	55

Liste des Figures

Figure 1.1 Photomicrographie de la progression des fissures dans un matériau due à la fatigue [3]	11
Figure 1.2 Schéma de définition du phénomène de fatigue [2]	12
Figure 1.3 Différents cas de sollicitations de fatigue : effort-temps ; effort-déformation [4]	13
Figure 1.4 Sollicitation alternée	14
Figure 1.5 Machine de flexion plane alternée Shenck « Webi » [6]	16
Figure 1.6 Machine de flexion rotative [6]	16
Figure 1.7 Schéma de principe d'une machine de fatigue servo-hydraulique, [7]	17
Figure 1.8 Machine de Fatigue à Vérin Electrique Haute Précision- Instron 8862 [7]	17
Figure 1.9 Spectre d'un aimant droit et symbolisation de quelques lignes de champ et vecteurs de champ magnétique [9]	18
Figure 1.10 Champ magnétique dans une bobine parcourue par un courant d'intensité I [9]	19
Figure 1.11 Bobine avec noyau ferromagnétique [9]	20
Figure 1.12 Règle des trois doigts de la main droite [10]	21
Figure 1.13 Schéma d'un circuit dans un moteur électrique [9]	22
Figure 1.14 Schéma d'un haut-parleur électrodynamique [9]	23
Figure 2.1 Eprouvette toroïdale de fatigue [12]	24
Figure 2.2 Eprouvette de fatigue à section parallélépipédique [13]	24
Figure 2.3 Eprouvette de fatigue	25
Figure 2.4 Pot vibrant et un schéma simplifié en vue en coupe représentant les principaux organes [14]	26
Figure 2.5 Schéma d'un système d'essai en vibrations [15]	27
Figure 2.6 Représentation de la Machine 1	28
Figure 2.7 Bride de serrage	28
Figure 2.8 Support de l'éprouvette	29
Figure 2.9 Machine utilisant deux électroaimants [16]	30
Figure 2.10 Représentation de la Machine 2 (Appui double)	30
Figure 2.11 Représentation de la Machine 2 (Deux appuis simples)	31

Figure 2.12 Etau de serrage	32
Figure 3.1 Epreuve de fatigue	33
Figure 3.2 Encastrement et charges appliquées à l'éprouvette.....	34
Figure 3.3 Contrainte de Von mises sur éprouvette ayant subi une force de 18 N.....	34
Figure 3.4 Déplacement au niveau de l'éprouvette ayant subi une force de 18 N	34
Figure 3.5 contrainte de Von Mises sur éprouvette ayant subi une force de 20 N	35
Figure 3.6 Déplacement au niveau de l'éprouvette ayant subi une force de 20 N.....	35
Figure 3.7 Contrainte de Von Mises sur éprouvette ayant subi une force de 22 N	35
Figure 3.8 Déplacement au niveau de l'éprouvette ayant subi une force de 22 N	35
Figure 3.9 Représentation d'une poutre Cantilever et évolution du moment fléchissant tout au long de la barre.....	39
Figure 3.10 Caractéristiques du matériau sur SolidWorks	40
Figure 3.11 Charges (en violet) et fixation (en vert) à la lame	40
Figure 3.12 Déplacement de la lame subissant une force de 3.75 N à son extrémité	40
Figure 3.13 Contrainte de Von Mises sur le ressort à lames subissant une force de 3.75 N à son extrémité.....	41
Figure 3.14 Ressort à lames	44
Figure 3.15 Bobine	44
Figure 3.16 Armature en perspective et vue de dessous.....	45
Figure 3.17 Butée	45
Figure 3.18 Aimant permanent 0,1T	46
Figure 3.19 Barres constituant les rails	46
Figure 3.20 La base de la machine, avec l'étau et les barres dessus.....	47
Figure 3.21 fixations des rails	47
Figure 3.22 Glissière et support bobine.....	48
Figure 3.23 Bobine avec entrefer en forme de E	48
Figure 3.24 Machine de fatigue (Machine 2).....	49
Figure 3.25 Machine 2 vue coté électroaimants	49
Figure 3.26 Machine 2 avec armoire de commande électronique	50

Nomenclature

Symboles latins

R	Rapport de charge	
R_e	Limite élastique du matériau	[MPa]
T	Période d'une sollicitation	[s]
N_R	Nombre de cycles à rupture	
B	Champ magnétique	[Tesla]
I	Intensité du courant traversant la bobine	[A]
H	Excitation magnétique	[A.m ⁻¹]
M_f	Moment fléchissant	[N.m]
E	Module d'élasticité	[GPa]
N	Nombre de cycles	
N_{st}	Nombre de spires théorique de la bobine	
N_s	Nombre de spires de la bobine	
I_G	Moment quadratique	[m ⁴]
d_{bobine}	Diamètre du gabarit de bobine	[m]
r_{moy}	Rayon moyen d'enroulement de la bobine	[m]

Symboles grecs

σ	Contrainte	[Pa]
σ_{max}	Contrainte maximale	[Pa]
σ_{min}	Contrainte minimale	[Pa]
σ_m	Contrainte moyenne	[Pa]
σ_a	Composante alternative	[Pa]
μ_0	Perméabilité magnétique du vide	[H.m ⁻¹]
μ	Perméabilité magnétique d'un matériau donné	[H.m ⁻¹]
ρ	Masse volumique du matériau	[Kg.m ⁻³]

Introduction générale

Le terme fatigue est utilisé pour exprimer le processus d'endommagement dans le cas des sollicitations cycliques sur des organes de machines. Ce processus d'endommagement peut mener à la rupture puis la ruine de la pièce.

Historiquement, le phénomène de fatigue a intéressé les ingénieurs depuis la révolution industrielle.

Durant cette époque, des pièces soumises à des contraintes globales cycliques calculées par la théorie de l'élasticité ou la résistance des matériaux se sont rompues brutalement.

Des chercheurs ont commencé à prendre en compte l'effet de ce type de chargement vers la moitié du 19^{ème} siècle. Un grave accident de chemin de fer, relaté vers 1842 provoqua plusieurs pertes en vies humaines près de Versailles en France, accident lié à une rupture par fatigue d'un axe au niveau de la locomotive. Rankine a été un pionnier dans l'étude des problèmes liés aux ruptures par fatigue. Il a pu, de par son poste en tant qu'ingénieur au niveau de la British Railways, relever les problèmes liés aux concentrations de contraintes et de leurs conséquences.

Wöhler a mis au point un montage permettant de réaliser un chargement cyclique en flexion, torsion et axiale en échelle réelle pour le compte des chemins de fer prussiens vers 1860.

Grâce à ces essais, il a pu mettre en évidence que la rupture par chargement cyclique est provoquée par une contrainte globale bien en deçà de la résistance à la traction.

La courbe de Wöhler tracée dans le plan contrainte-nombre de cycles à rupture est devenue un outil incontournable pour mener une étude sur le phénomène de fatigue.

A partir de cette courbe, une contrainte est déduite pour laquelle l'organe de machine peut fonctionner " indéfiniment ". Wöhler a donné à cette contrainte l'appellation de contrainte de service. Pour Baushinger cette contrainte est la limite élastique naturelle. Elle est généralement appelée limite de fatigue.

La rupture par fatigue cause environ 80% des accidents mécaniques. Certains d'eux ont eu de graves conséquences même de nos jours. Sur l'avion d'Aloha Airlines, le vol 243, qui était supposé relier Honolulu à Hawaï en 1988, des fissures dues à la fatigue tout au long des lignes de rivets ont provoqué une décompression explosive en vol. L'équipage et les passagers ont miraculeusement survécu à cette mésaventure. [1]

Le but de notre Projet de fin d'études est de mobiliser les forces électromagnétiques pour réaliser des essais de fatigue. On procèdera donc à la conception d'une machine de fatigue en flexion plane qui reposera, sur le phénomène électromagnétique. Cette solution permet de réaliser des essais le moins bruyants possible et présentant l'avantage d'être économiques.

Le mémoire de ce projet est constitué de trois chapitres.

Nous traitons dans le premier chapitre des notions de fatigue des matériaux ainsi que le phénomène magnétique et électromagnétique.

Le deuxième chapitre est consacré à la démarche suivie pour la conception de deux machines.

Le dernier chapitre comporte une étude des performances de la machine après sa réalisation avec des tests préliminaires.

Les annexes comportent les dessins de définition des organes des deux machines réalisées.

Chapitre 1 : Aspects théoriques relatifs à l'étude

1.1- Fatigue des matériaux et machines de fatigue

Introduction

Toute pièce mécanique soumise durant son fonctionnement normal à un certain nombre de sollicitations variables se traduit par des variations cycliques des contraintes.

Or, il est malheureusement souvent constaté, la ruine catastrophique, d'un certain nombre de structures alors que celles-ci ne sont soumises qu'à des contraintes cycliques d'intensité modérée par rapport aux capacités statiques des matériaux définis communément par leur résistance à la rupture et leur limite d'élasticité.

Ce processus d'endommagement par fatigue comprend trois phases d'importances variables suivant les matériaux et les caractéristiques des sollicitations [2] :

- Période d'amorçage
- Période de propagation
- Rupture brutale

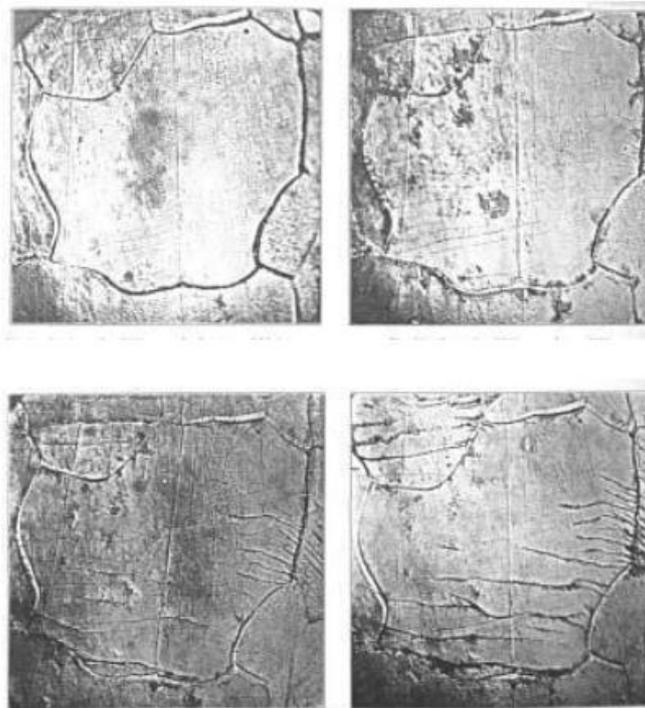


Figure 1.1 Photomicrographie de la progression des fissures dans un matériau due à la fatigue [3]

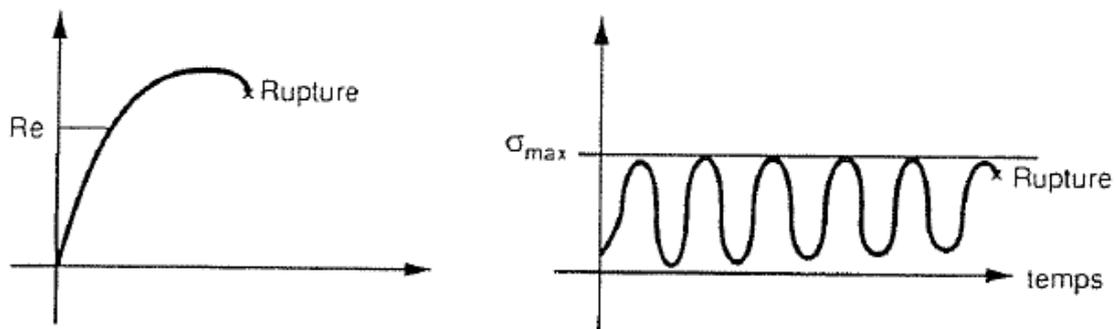


Figure 1.2 Schéma de définition du phénomène de fatigue [2]

1.1.1- Modes de chargement

Le chargement, en uniaxial est défini par l'amplitude de contrainte maximale au cours d'un cycle, σ_{max} , par la valeur moyenne de la contrainte, σ_m et par le rapport entre la contrainte minimale, σ_{min} et σ_{max} , soit $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$. Notons que l'on est parfois conduit à distinguer la composante alternative σ_a de la composante statique, σ_m . Ainsi, selon les valeurs relatives de ces deux composantes, on distingue les essais sous sollicitation :

- alternée symétrique	$\sigma_m = 0$	$R = -1$
- alternée dissymétrique	$0 < \sigma_m < \sigma_a$	$-1 < R < 0$
- répétée	$\sigma_m = 0$	$R = 0$
- ondulée	$\sigma_m > \sigma_a$	$0 < R < 1$

Ces modes sont résumés ci-dessous [4] :

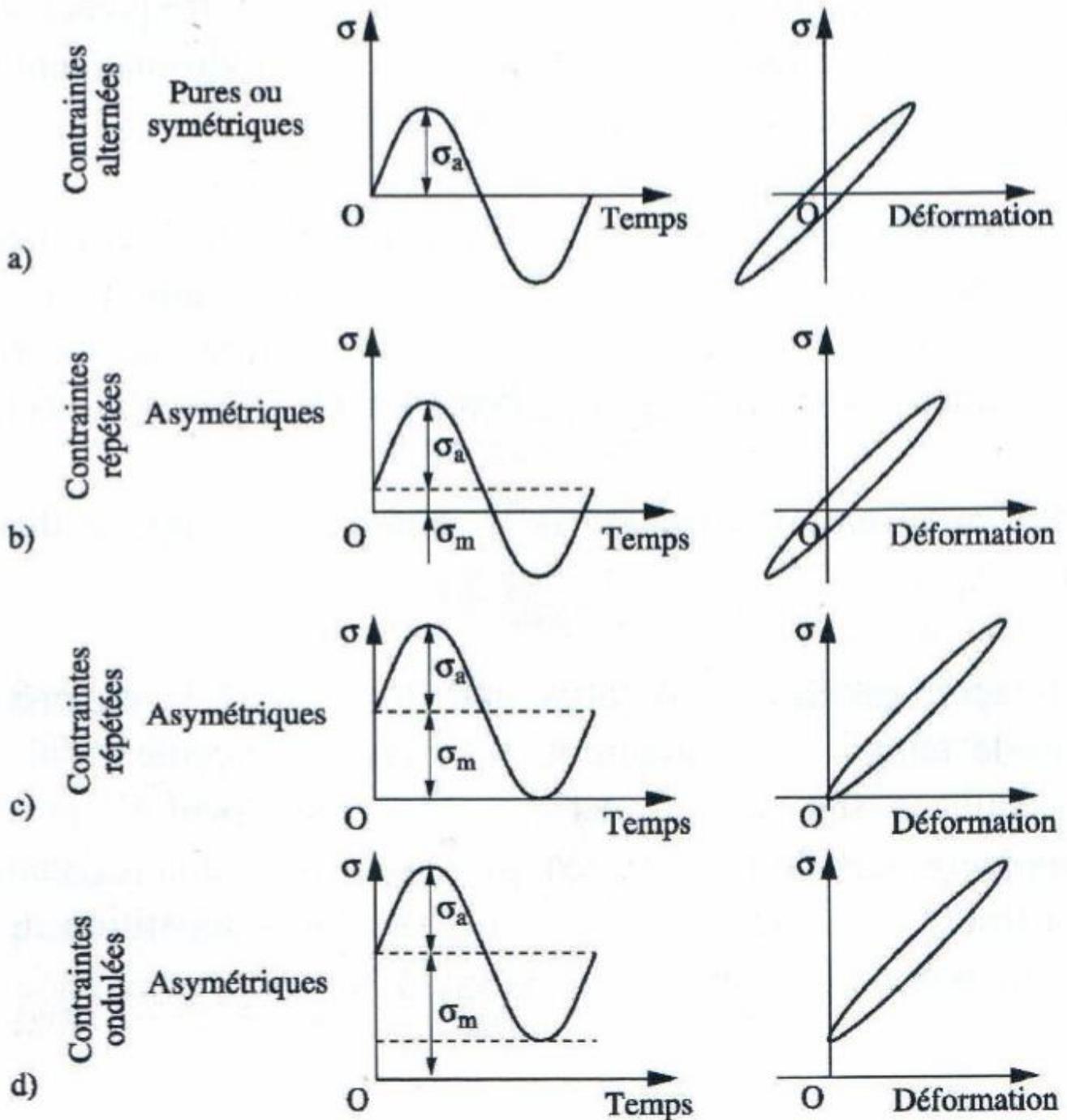


Figure 1.3 Différents cas de sollicitations de fatigue : effort-temps ; effort-déformation [4]

On considère dans notre cas une approche mettant en œuvre des sollicitations alternées

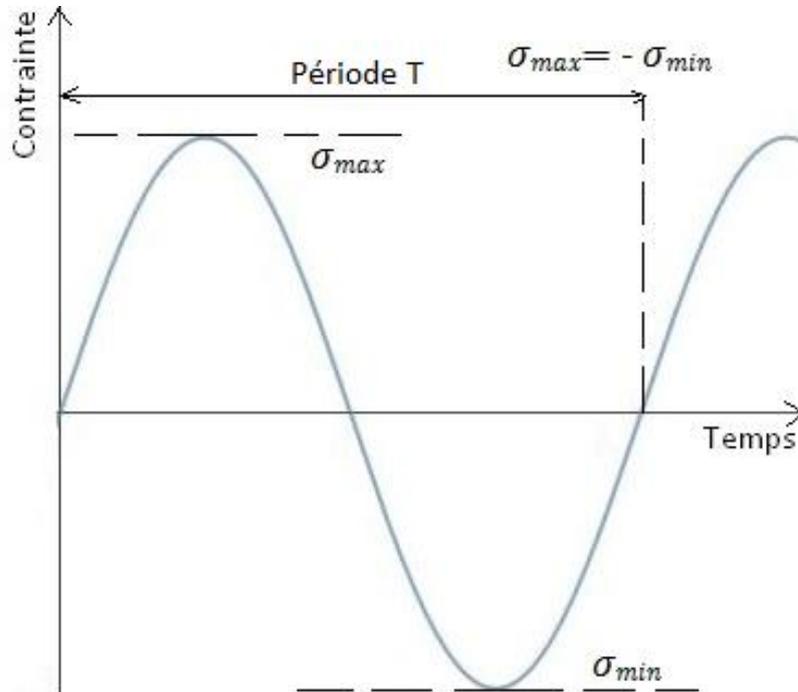


Figure 1.4 Sollicitation alternée

La fatigue se produit de façon générale sans déformation plastique d'ensemble, ce qui la rend difficile à détecter, mais avec une déformation plastique localisée autour des défauts présents dans les matériaux, à fond d'entaille dans les structures, ou à l'extrémité d'une fissure.

Pour les métaux, en général, l'endommagement de fatigue ne dépend pas de la fréquence. De plus, la durée de vie est généralement mesurée par le nombre de cycles à rupture, N_R . L'exécution de N cycles ($N < N_R$) entraîne un certain endommagement qu'il est important de chiffrer car il permet de déterminer la durée de vie résiduelle de la structure et la gestion de son exploitation, comme les intervalles d'inspection de maintenance.

De manière générale, la présence de la fatigue est liée à celle d'efforts variables dans le temps. La particularité de l'endommagement par fatigue et, par conséquent son danger, correspond au fait que la rupture peut se produire pour des contraintes apparemment faibles, souvent bien

inférieures à la résistance à la traction et même à la limite d'élasticité du matériau, lorsque la répétition de ces efforts se produit un grand nombre de fois [5].

1.1.2- Les essais de fatigue

Pour se mettre à l'abri des défaillances possibles du métal par suite de la fatigue, il faut calculer les pièces soumises à des efforts variables. En outre, les changements brusques de section par les entailles, les trous conduisent à des concentrations de contraintes qui ont eux aussi une influence néfaste sur les pièces en fatigue. C'est ce que l'on appelle fatigue sous entailles.

On est donc conduit à faire des essais dans des conditions aussi voisines que possible de celles d'utilisation sur des éprouvettes ou des pièces elles-mêmes.

Il existe, pour chaque matériau métallique soumis à des efforts variables, quelle que soit sa nature, une limite de résistance dite limite de fatigue ou d'endurance.

Pour déterminer cette caractéristique les chercheurs ont conçu différentes machines permettant de réaliser sur des éprouvettes des efforts :

- Axiaux : traction et compression.
- De flexions : plane et rotative.
- Et de torsions.

Grâce à l'apport des nouvelles technologies, les machines d'essais universelles et machines de fatigue en particulier ont gagné en performances.

Pour les essais de fatigue en flexion plane des éprouvettes de tôle sont mises en flexion dans un plan fixe. Un exemple de machine ancienne est représenté sur la photo ci-dessous [6].

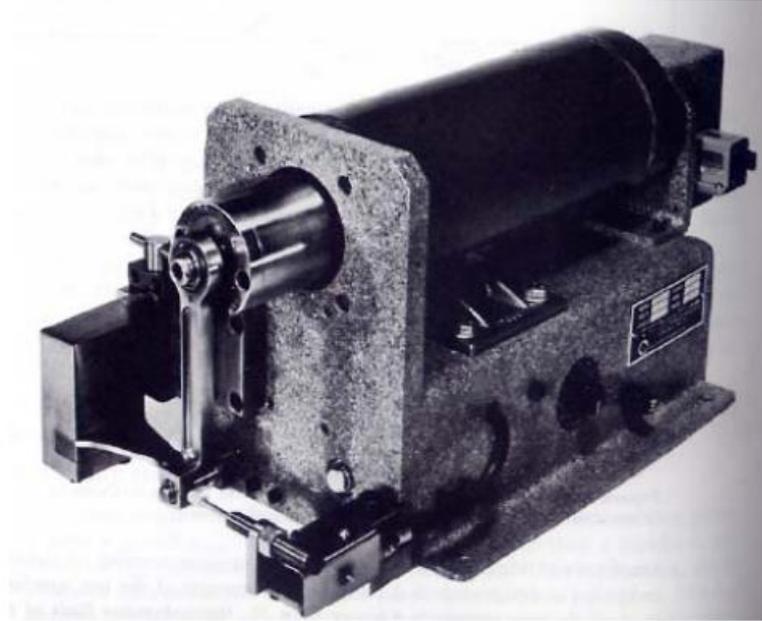


Figure 1.5 Machine de flexion plane alternée Shenck « Webi » [6]

La machine représentée sur la figure ci-dessous permet de réaliser des essais de fatigue en flexion rotative. Pour la machine, le système de chargement est réalisé grâce à des masses ajoutées au fur et à mesure de l'essai. L'éprouvette est entraînée par un moteur grâce à un accouplement élastique. Le nombre de cycles est mesuré avec un compte tour relié au moteur.

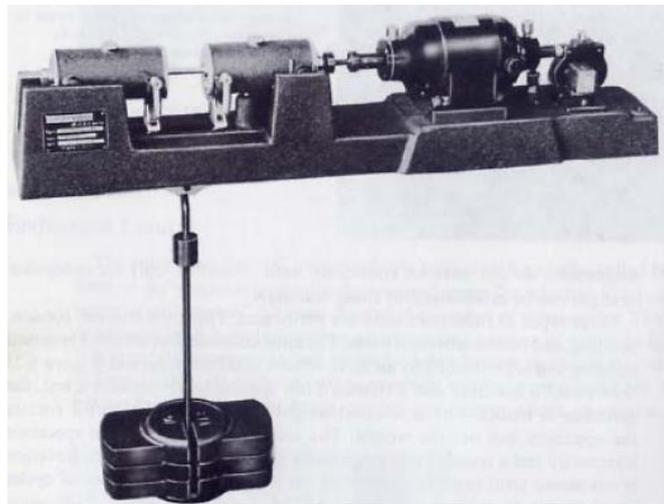


Figure 1.6 Machine de flexion rotative [6]

Avec l'avènement et l'apport de l'électronique, de l'informatique et des systèmes d'acquisition, les machines de fatigue modernes actuelles sont des machines complètement asservies par ordinateur.

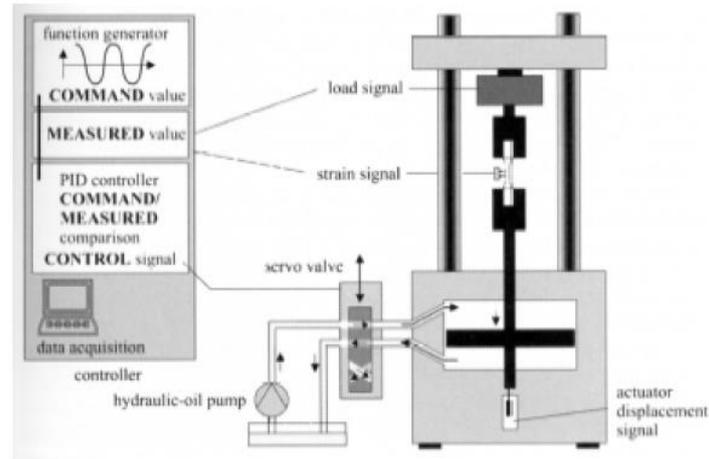


Figure 1.7 Schéma de principe d'une machine de fatigue servo-hydraulique, [7]

La machine ci-dessous est parmi les plus récente machine de fatigue. Grâce au vérin électrique, ce type de machine devient plus silencieux. La maintenance est facilitée. Il n'y a plus les problèmes de fuite d'huiles telles que sur les machines servo-hydrauliques. L'inconvénient reste leur prix [7].



Figure 1.8 Machine de Fatigue à Vérin Electrique Haute Précision- Instron 8862 [7]

Dans notre étude, nous nous intéressons à la flexion plane alternée

La machine que nous devons concevoir doit réaliser des essais de fatigue en utilisant les forces électromagnétiques et réaliser des analyses vibratoires. Dans ce qui suit des éléments d'électromagnétisme sont présentés.

1.2- Notion en magnétisme et magnétostatique

Notre machine utilise les forces électromagnétiques.

1.2.1- Le champ magnétique

Le champ magnétique est une grandeur ayant le caractère d'un champ vectoriel, c'est-à-dire caractérisée par la donnée d'une norme, d'une direction et d'un sens, défini en tout point de l'espace, permettant de modéliser et quantifier les effets magnétiques du courant électrique ou des matériaux magnétiques comme les aimants permanents [8].

Les sources de champs magnétiques existent à l'état naturel (Terre, aimant naturel) ou peuvent être créés artificiellement (aimant, électro-aimant).

L'unité du champ magnétique \vec{B} est le Tesla (T) et le champ magnétique se mesure avec un Tesla mètre.

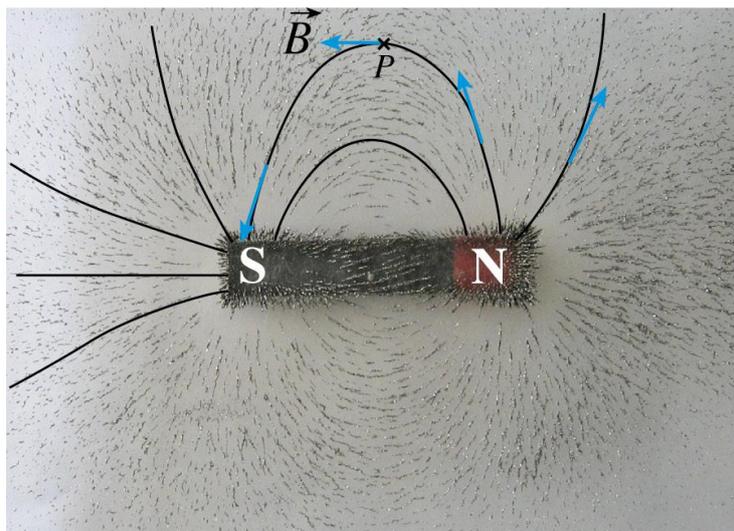


Figure 1.9 Spectre d'un aimant droit et symbolisation de quelques lignes de champ et vecteurs de champ magnétique [9]

A partir de la figure précédente, on constate que les lignes de champ sont dirigées du pôle nord vers le pôle sud. Le champ \vec{B} est tangent aux lignes de champ en tout point.

1.2.1.1- Le champ magnétique créé par un courant

La source microscopique d'un champ magnétique est le déplacement de charges électriques. Un courant électrique étant un déplacement de charges électrique va donc générer un champ magnétique. Cette propriété est utilisée dans de nombreux systèmes électrotechniques :

- électro-aimants (gâchette de porte d'entrée, engin de levage de ferraille)

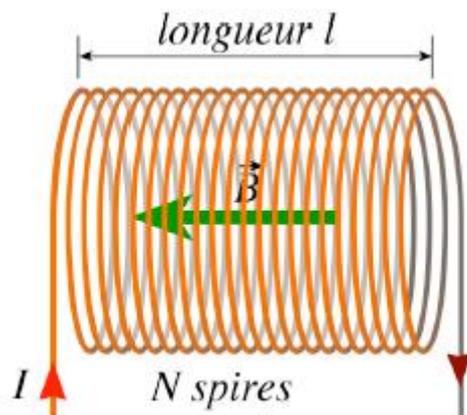


Figure 1.10 Champ magnétique dans une bobine parcourue par un courant d'intensité I [9]

1.2.1.2-Champ magnétique au milieu d'un solénoïde :

Un solénoïde est une bobine qui possède une longueur l et une répartition uniforme de N spires.

Nous avons vérifié expérimentalement que le champ magnétique s'exprimait de la façon suivante

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{u.s.i.} = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{u.s.i.}$$

Excitation magnétique :

Les termes N , l et I dépendent de la source de champ magnétique (la bobine).

Le terme μ_0 dépend du milieu qui se trouve au centre de la bobine (l'air).

On définit l'excitation magnétique \vec{H} qui ne dépend que de la source.

Pour le solénoïde l'intensité \vec{H} (le module du vecteur) va s'exprimer :

$$H = \frac{N}{l} I$$

Si l'on place un noyau ferromagnétique (alliage à base de fer) dans la bobine, le champ sera plus intense. Cette propriété est utilisée dans les moteurs électriques et les transformateurs [9].

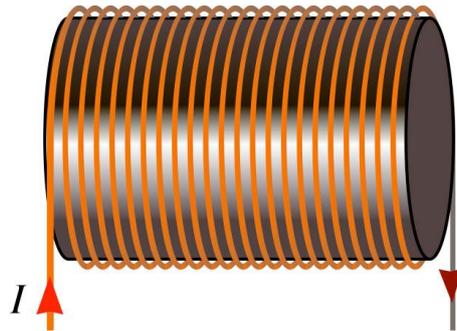


Figure 1.11 Bobine avec noyau ferromagnétique [9]

Le champ magnétique s'exprimera dans ce cas :

$$B = \mu * H = \mu \frac{N}{l} I$$

μ étant bien plus grand que μ_0

1.2.2- La force de Laplace

La force électromagnétique \vec{F} exercée par un champ magnétique uniforme \vec{B} sur une portion de circuit de longueur L , parcourue par un courant électrique d'intensité I a une direction perpendiculaire au plan défini par la portion de circuit et le champ magnétique, ainsi qu'un sens déterminé par la règle de la main droite [10].

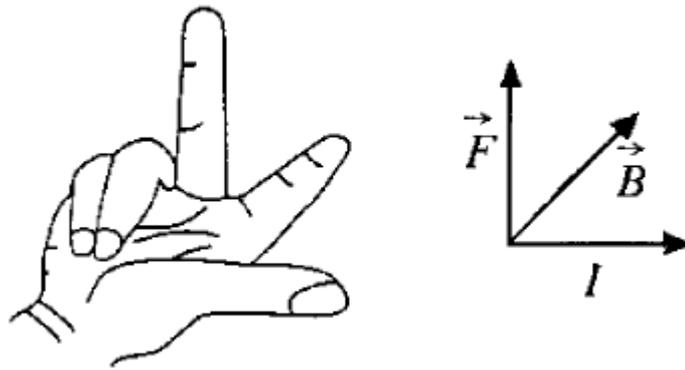


Figure 1.12 Règle des trois doigts de la main droite [10]

La valeur de cette force est donnée par l'expression :

$$F = BIL \sin\alpha$$

Avec :

α : Angle entre la portion du circuit et le vecteur champ magnétique \vec{B}

Applications de la force de Laplace :

- Le moteur électrique :

Les fils diamétralement opposés sont associés deux à deux. Chaque couple de ces fils équivaut à une sorte de cadre rectangulaire. Un fil est parcouru par un courant de même intensité que son opposé mais de sens contraire.

L'ensemble des deux fils exerce un couple de force qui fait tourner le rotor et donc son axe. Ce sont des forces électromagnétiques qui font tourner l'axe du moteur électrique.

Le moteur électrique permet la conversion de travail électrique en énergie mécanique.

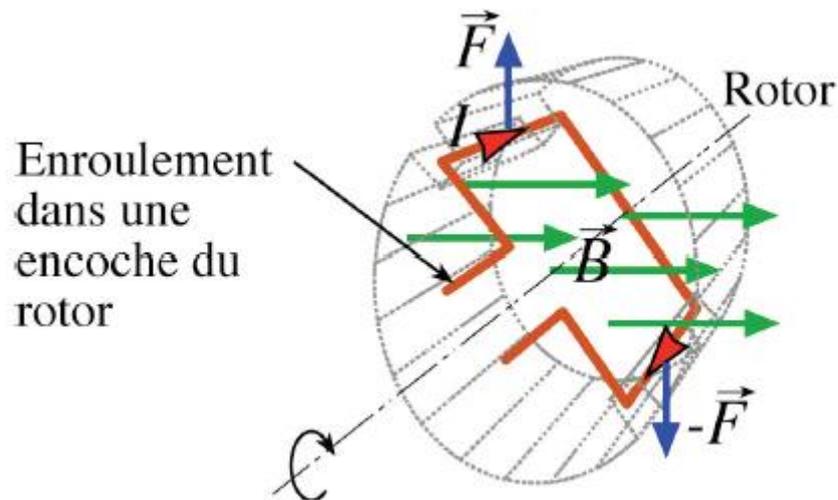


Figure 1.13 Schéma d'un circuit dans un moteur électrique [9]

- Le haut-parleur électrodynamique :

Le haut-parleur est constitué d'un aimant dont le pôle nord est au centre et le pôle sud sur les côtés. Le champ magnétique créé dans l'entrefer est radial. Une bobine de diamètre D est placée dans l'entrefer. Elle est solidaire de la membrane du haut-parleur.

La force de Laplace que subit la bobine en étant placée dans le champ magnétique de l'aimant est donnée par l'expression :

$$\|\vec{F}\| = I * \|\vec{B}\| * L$$

Avec

$$L = N * 2 * \pi * R$$

On constate que F est proportionnelle à I. De plus son sens dépend de celui du courant. Ainsi la bobine, et donc la membrane qui lui est liée, est abaissée ou soulevée et plus ou moins en fonction du courant. Si le courant est périodique, le mouvement de la membrane le sera aussi et provoquera une vibration de l'air alentour [11].

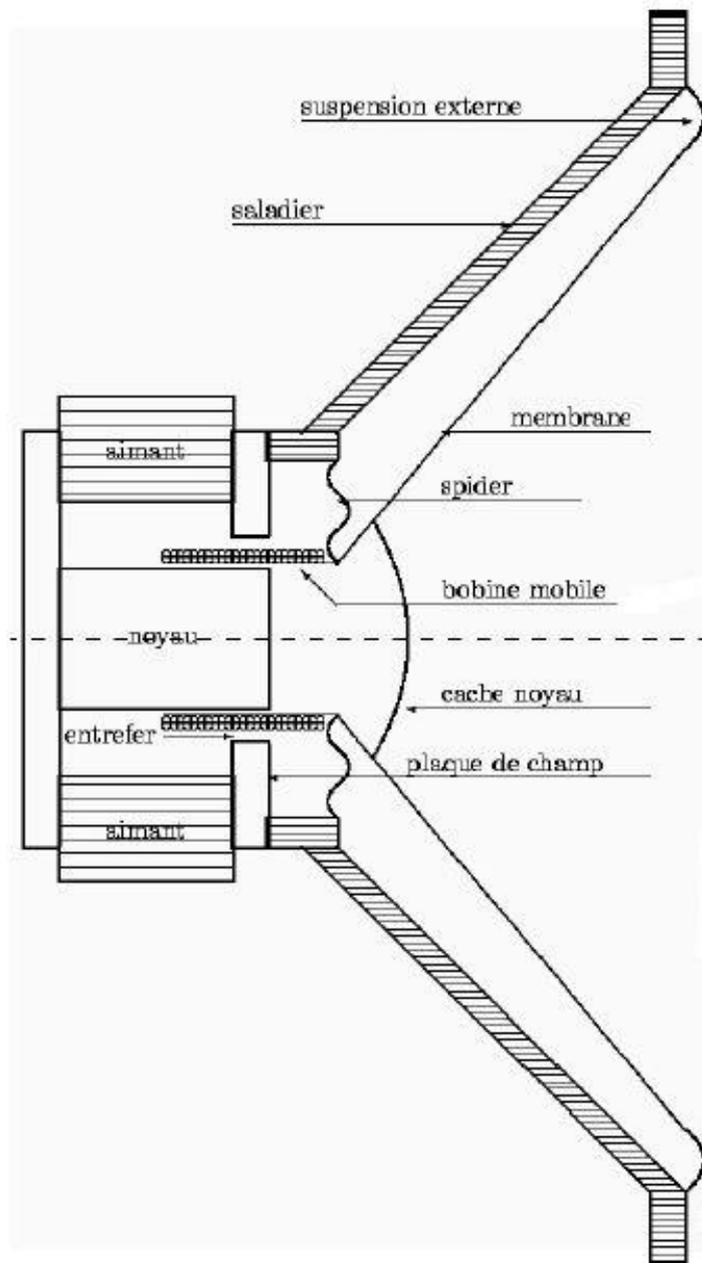


Figure 1.14 Schéma d'un haut-parleur électrodynamique [9]

Conclusion

Grâce aux forces électromagnétiques, une alternative est ouverte pour réaliser des essais de fatigue et des essais vibratoires.

Chapitre 2 : Méthodologie et conception

Introduction

La machine de fatigue est une machine assez sensible, car elle devra tester un nombre d'éprouvettes et par conséquent trouver leur limite d'endurance. C'est pour cela qu'avant de passer à la conception de notre machine, un nombre d'étapes préliminaires doit être suivi afin de s'assurer de la fiabilité et de la précision des essais que nous allons effectuer.

2.2- Les éprouvettes de fatigue

Les éprouvettes peuvent être de géométries variées, en fonction de ce que l'on cherche à caractériser. Classiquement, elles peuvent être à section circulaire ou parallélépipédique, et d'épaisseur constante ou variable. Les plus générales sont les éprouvettes toroïdales, à section circulaire variable.



Figure 2.1 Eprouvette toroïdale de fatigue [12]



Figure 2.2 Eprouvette de fatigue à section parallélépipédique [13]

Enfin, les éprouvettes peuvent être lisses ou entaillées. L'état de surface doit être particulièrement soigné et répétitif, et l'usinage ne doit pas introduire de contraintes résiduelles importantes. [12]

L'éprouvette à laquelle on fera subir nos tests possède une section parallélépipédique, comme représenté sur la figure ci-dessous.

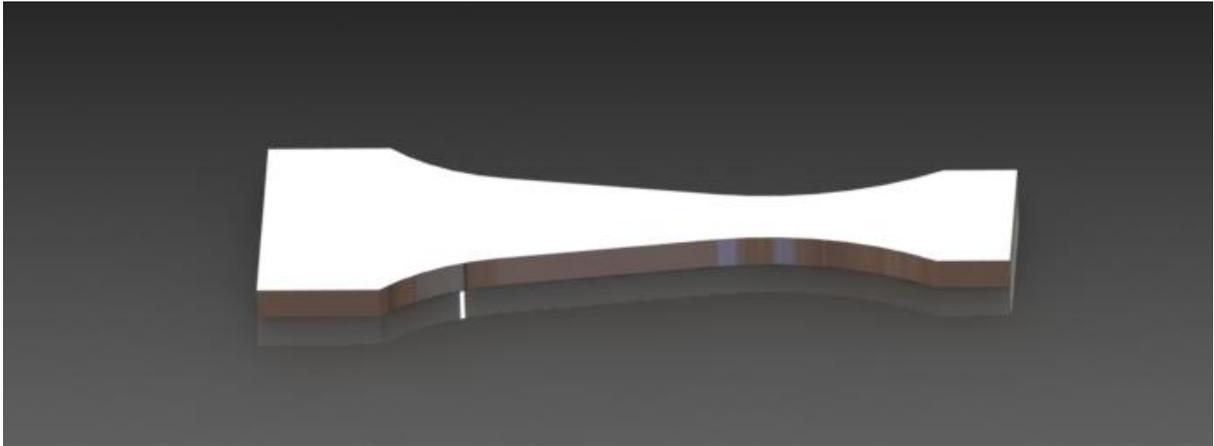


Figure 2.3 Eprouvette de fatigue

2.3- Conception de la machine sous SOLIDWORKS

Afin de réaliser notre machine, nous avons recouru au logiciel de conception 3D qu'est SolidWorks.

Les solutions SolidWorks abordent tous les aspects du processus de développement produit grâce à un ensemble d'opérations intégrées effectuées en toute transparence (conception, vérification, conception éco responsable, communication et gestion des données).

Les concepteurs et les ingénieurs possèdent de multiples compétences, qui leur permettent de réduire le cycle de conception, d'augmenter la productivité et de commercialiser plus rapidement des produits innovants [4].

Au cours de notre projet, plusieurs solutions ont été abordées. Certaines étant plus tangibles que les autres, vu que chacune avait ses points forts et ses points faibles.

On citera à ce niveau celles qui ont été retenues, aussi bien pour leur innovation que pour leur simplicité.

Dans toutes les machines qui ont été conçues, un dispositif de serrage a été nécessaire pour la fixation de l'éprouvette.

2.3.1- Modèle de la machine 1

Cette machine intègre un dispositif déjà existant, mais qui n'est pas utilisé aux fins des tests de fatigue ; il s'agit bien évidemment des pots vibrants plus connus sous le nom de « shaker ».

Le **vibrateur** (appelé aussi excitateur ou pot vibrant) est l'élément clé qui transmettra à l'échantillon la sollicitation définie par le profil d'essais.

Un vibrateur fonctionne suivant le même principe électromagnétique qu'une **baffle audio**. Le mouvement qu'il transmet est provoqué par celui d'une bobine traversée par un courant électrique et placée dans un champ magnétique. Le champ est généré par un aimant permanent dans le cas des petits excitateurs ou par un électroaimant dans les plus importants.

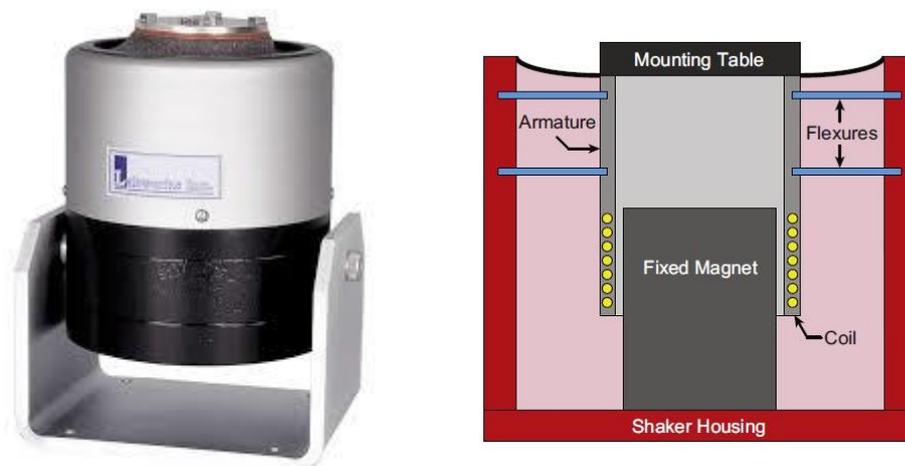


Figure 2.4 Pot vibrant et un schéma simplifié en vue en coupe représentant les principaux organes [14]

Le vibreur fait partie d'un ensemble d'éléments constituant le système d'essais en vibrations, ce dernier comporte aussi un amplificateur de puissance qui fournit le courant électrique nécessaire à l'alimentation de la bobine. De ce courant dépend la force délivrée par le vibreur et l'accélération communiquée à l'équipage mobile. La vitesse vibratoire, en revanche, est proportionnelle à la tension appliquée.

S'ajoute à ce dispositif un contrôleur dont la fonction est de garantir que l'essai est conforme à la spécification, et cela en asservissant le niveau vibratoire délivré en corrigeant l'écart entre le signal mesuré et le signal de consigne. [15]

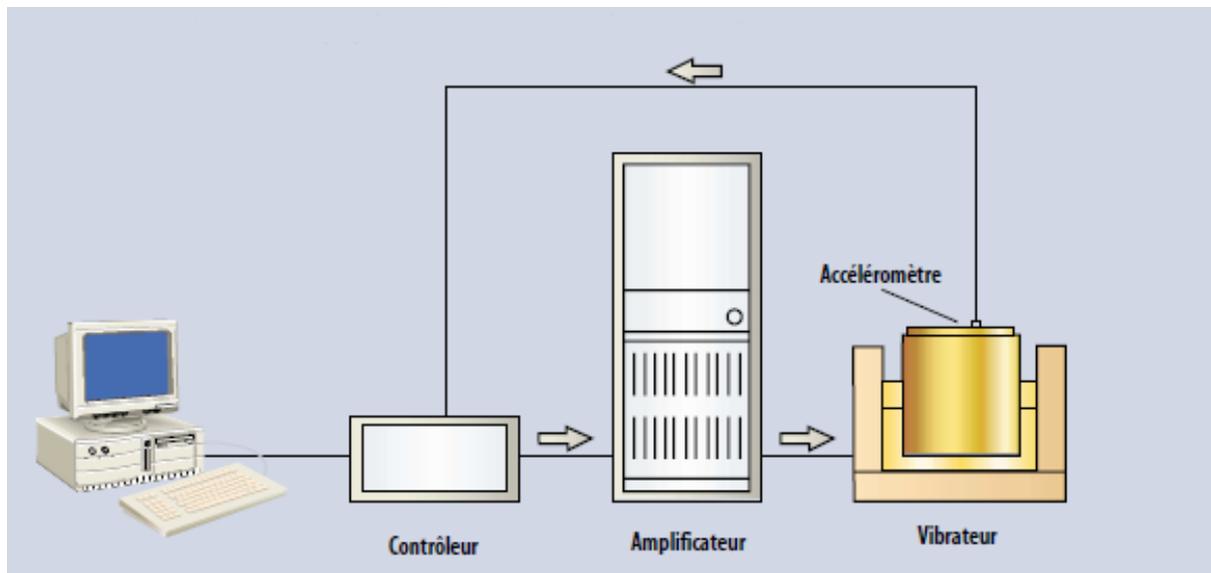


Figure 2.5 Schéma d'un système d'essai en vibrations [15]



Figure 2.6 Représentation de la Machine 1

L'assemblage est vissé à la table via des vis au niveau de la base du pot.

L'éprouvette est solidarisée au pot vibrant par le biais de brides de serrage de la forme suivante :

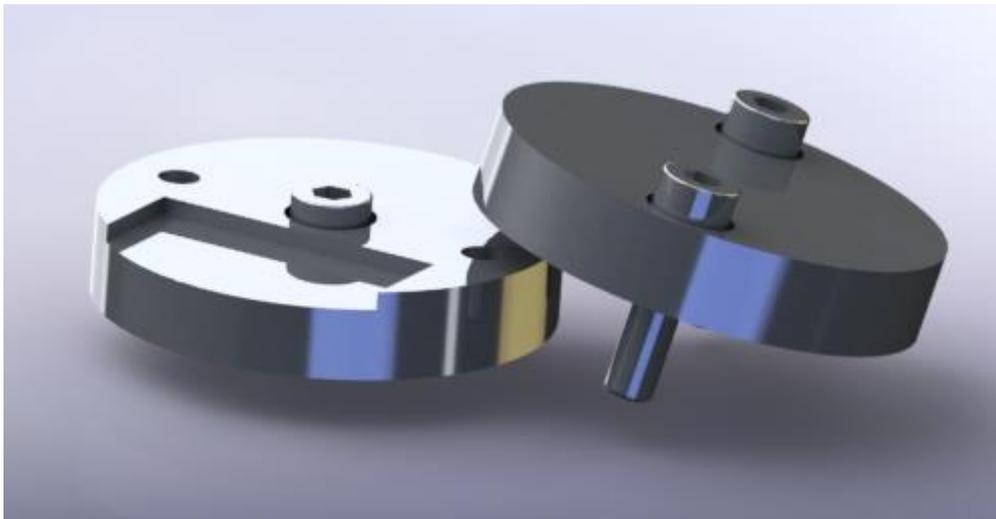


Figure 2.7 Bride de serrage

Pour ce qui est de la table, l'éprouvette y est positionnée par un support permettant de la placer à la même hauteur que le pot, tout en assurant une fixation de type encastrement

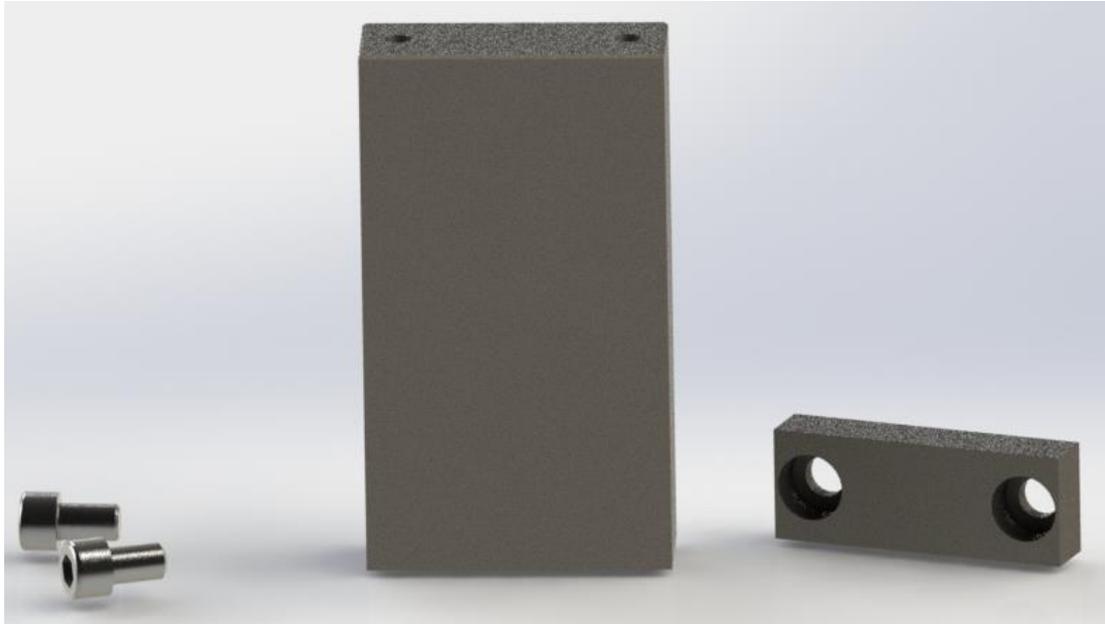


Figure 2.8 Support de l'éprouvette

2.3.2- Modèle de la machine 2

Pour ce qui est de la deuxième conception, et après avoir parcouru les nombreuses possibilités pouvant impliquer des systèmes à dispositifs électromagnétiques, nous avons décidé que la machine 2 comporterait deux électroaimants attirant tour à tour la partie ferromagnétique fixée au niveau de l'éprouvette.

La machine utilisée par [13] utilise deux électroaimants. Notre machine est similaire à celle que nous avons réalisé. Cependant, notre machine présente un meilleur avantage dans le sens que le fait que cette dernière permet de réaliser des essais sur des éprouvettes de différentes longueurs et ce grâce au déplacement vertical des électroaimants. De plus notre machine pourra réaliser des essais sur des éprouvettes avec plusieurs options de fixations (encastrement, double encastrement, encastrement-appui simple, double appui simple)

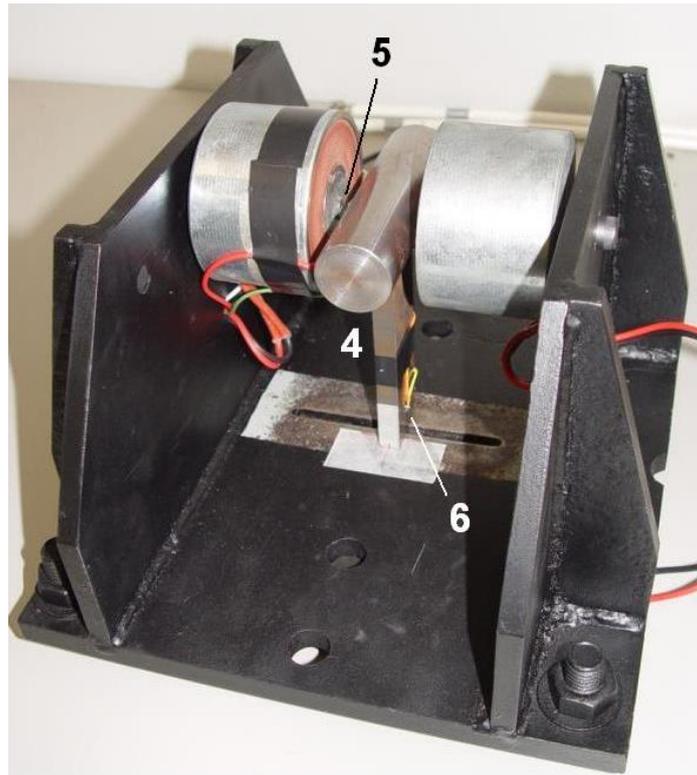


Figure 2.9 Machine utilisant deux électroaimants [16]

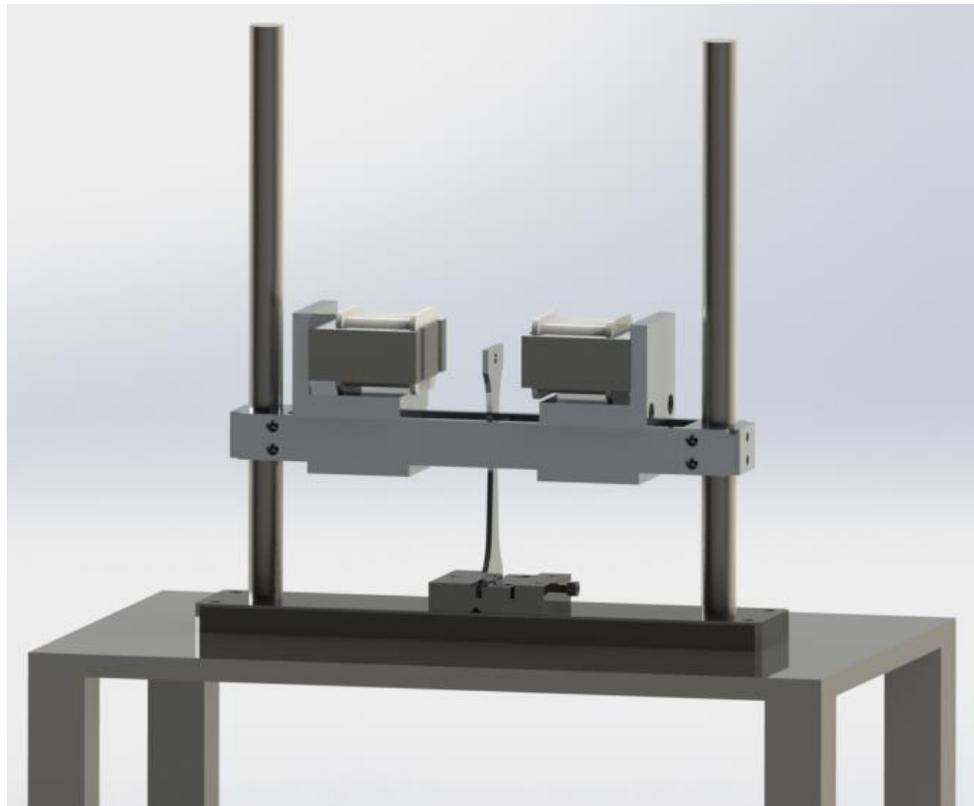
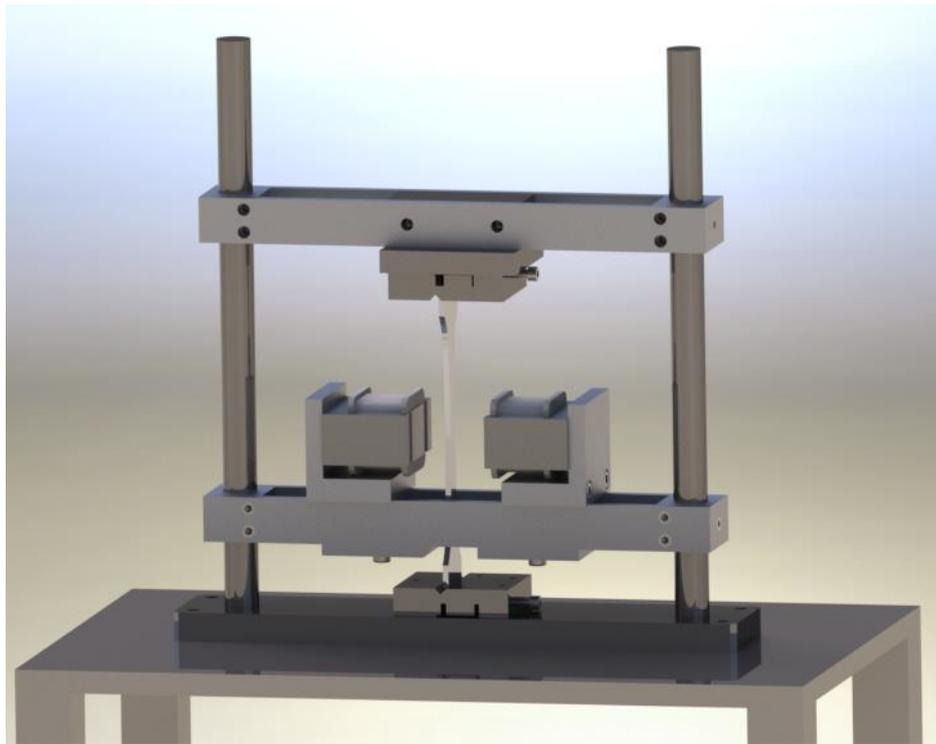


Figure 2.10 Représentation de la Machine 2
(Appui double)



*Figure 2.11 Représentation de la Machine 2
(Deux appuis simples)*

La tension de sortie des deux électroaimants est contrôlée par un circuit de commande électronique qui génère des impulsions de largeur modulée aux électroaimants, la tension de consigne variant entre V_c et $-V_c$.

Par exemple, si la tension de consigne est égale à V_c , la commande envoie un signal PWM (Pulse Width Modulated) à l'électroaimant #1 avec une impulsion de 0% et un signal PWM à l'électroaimant #2 avec une impulsion de 100% (totalité de l'amplitude de tension), et inversement lorsque la consigne est égale à $-V_c$ [16].

L'éprouvette dans cette machine est fixée par rapport à la base via un étau de serrage permettant deux configurations : encastrement à la base et sollicitation à l'extrémité, et double appui simple aux extrémités de l'éprouvette et sollicitation au milieu

Cet étau a la géométrie suivante :

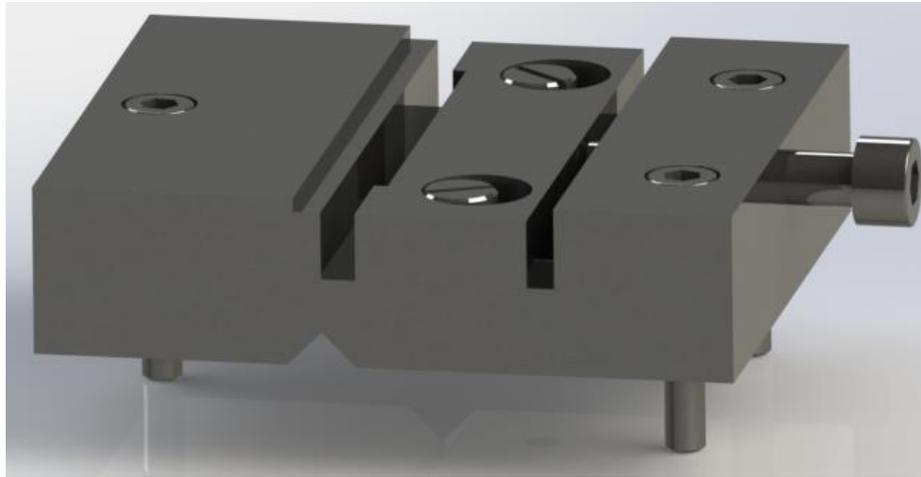


Figure 2.12 Etau de serrage

Chapitre 3 : Calculs relatifs à la conception et réalisation de la machine

3.1- Calculs relatifs à l'éprouvette

Les éprouvettes pour lesquelles on va dimensionner les bobines présentées dans les deux machines sont en plexiglas. Cette éprouvette a des dimensions représentées dans la figure ci-dessous [17]

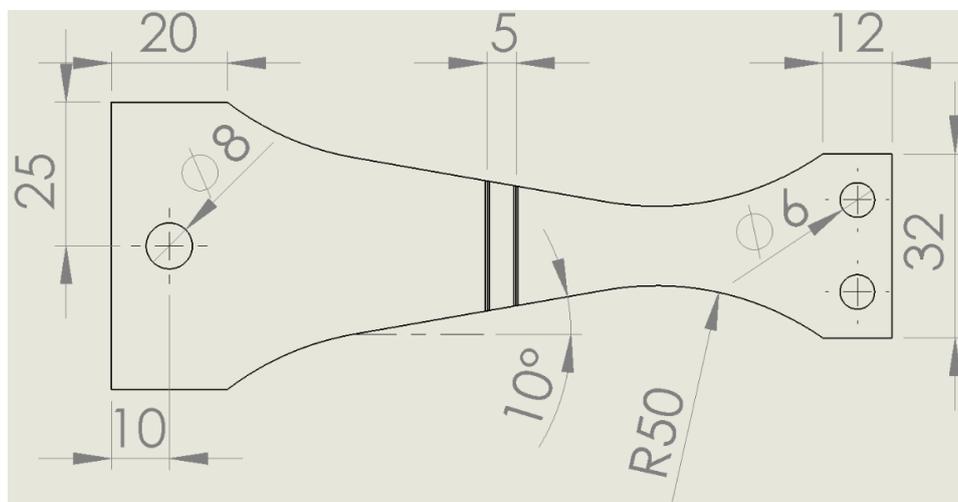


Figure 3.1 Epreuve de fatigue

Nous nous sommes inspiré de l'éprouvette utilisée par Meliani Khaled, sans pour autant entailler notre éprouvette, ceci n'étant pas le thème de notre projet.

On utilisera une approche en utilisant SolidWorks pour définir la force nécessaire à appliquer à notre éprouvette suivant le matériau et les dimensions adoptées.

On représente l'éprouvette avec l'encastrement (en flèches vertes) et les charges appliquées (en flèches violettes) sur la figure qui suit

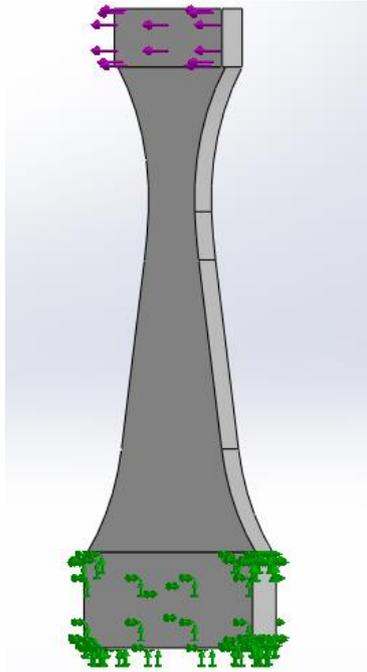


Figure 3.2 Encastrement et charges appliquées à l'éprouvette

En appliquant une force de la valeur de 18 N, on obtient :

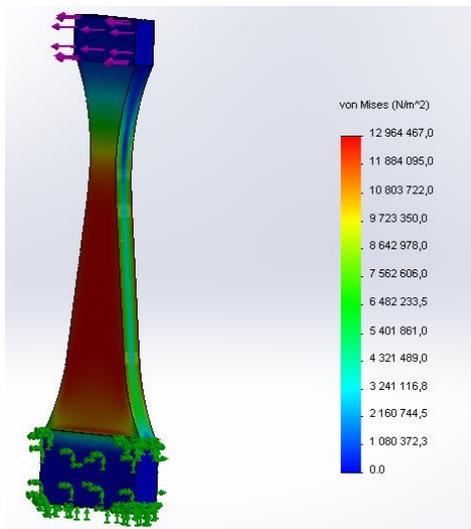


Figure 3.3 Contrainte de Von mises sur éprouvette ayant subi une force de 18 N

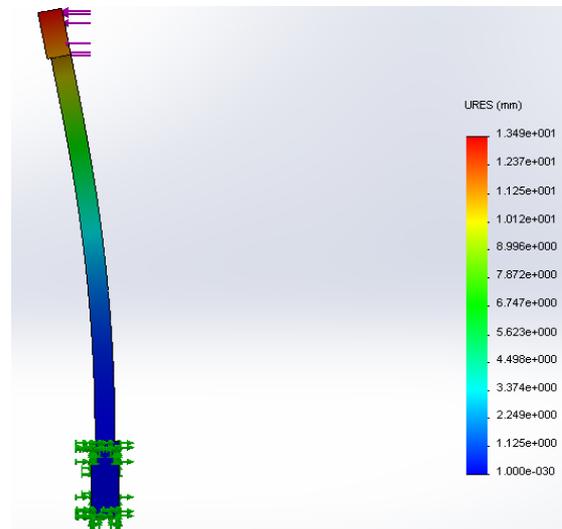


Figure 3.4 Déplacement au niveau de l'éprouvette ayant subi une force de 18 N

En appliquant une force de la valeur de 20 N, on obtient les résultats suivants :

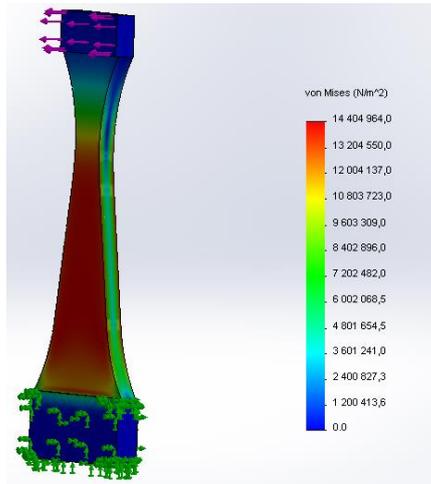


Figure 3.5 contrainte de Von Mises sur éprouvette ayant subi une force de 20 N

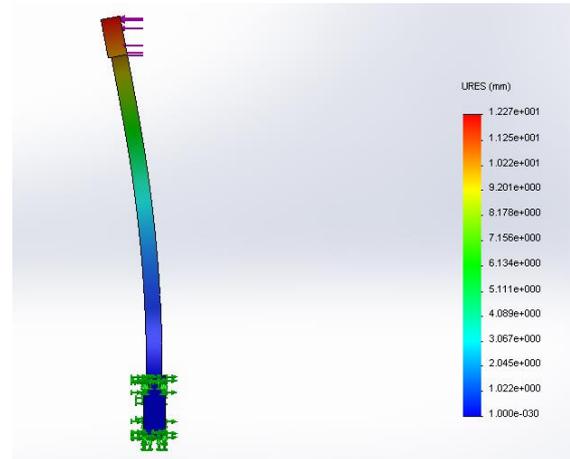


Figure 3.6 Déplacement au niveau de l'éprouvette ayant subi une force de 20 N

Nous appliquons une force de la valeur de 22 N, et on obtient les résultats représentés ci-dessous :

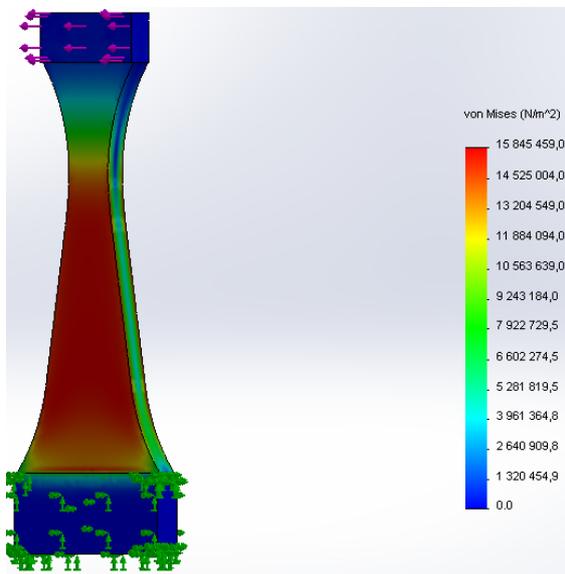


Figure 3.7 Contrainte de Von Mises sur éprouvette ayant subi une force de 22 N

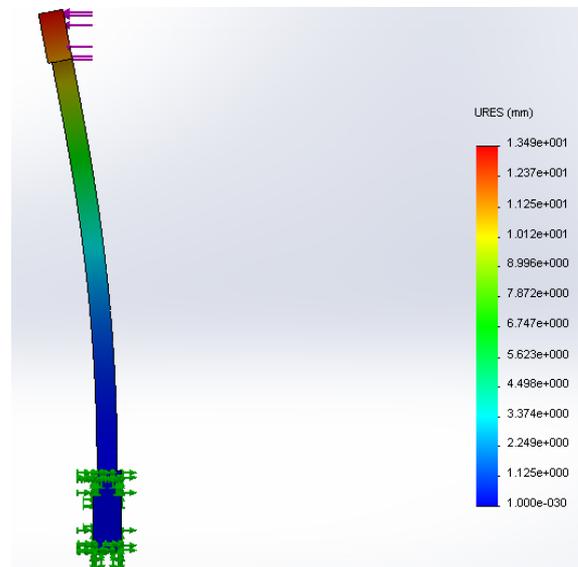


Figure 3.8 Déplacement au niveau de l'éprouvette ayant subi une force de 22 N

Le matériau ayant une limite élastique $R_e=70$ MPa, les trois configurations sont acceptables vu que la contrainte maximale de Von Mises reste inférieure dans les trois cas de figure à cette valeur.

En prenant en considération que la force générée au niveau de l'électroaimant pour la machine 2 est inversement proportionnelle au carré de la distance entre cette dernière et l'éprouvette, et le fait que nous sommes supposés garder une petite marge de distance lors du fonctionnement entre l'éprouvette et l'électroaimant, la valeur de la force $F=20$ N nous est parue acceptable et adéquate.

On a donc un déplacement maximal de 12.27 mm à l'extrémité de l'éprouvette, ce qui est une valeur tolérable et ne provoque pas de conflits avec les conditions déjà présentes au niveau de nos tests.

Ces calculs préliminaires ont été faits pour un pré dimensionnement des électroaimants

3.2- Calculs relatifs à la Machine 1

Les deux pièces primordiales dans cet assemblage et dont les dimensions contrôleraient celles du reste des composants sont bien évidemment la bobine et le ressort à lames.

On se doit par conséquent de procéder à un dimensionnement de ces deux composants afin de s'assurer du bon fonctionnement et de fiabilité des résultats de notre machine.

3.1.1- Calcul du nombre de spires et de la masse de la bobine

La bobine est l'élément générateur de mouvement au sein de notre dispositif, ce mouvement est provoqué par une force définie par la loi de Laplace qui stipule que :

$$F = N_s B I L \quad (3.1)$$

N_s : Nombre de spires de la bobine

B : Champ magnétique (T)

I : Intensité du courant (A)

L : Longueur de fil correspondant à une spire (m)

Nous avons convenu qu'une force de 30 N serait suffisante pour compenser le poids de l'ensemble bobine-armature-butée-bridés et faire subir des efforts de flexion à l'éprouvette de test

L'intensité maximale de courant traversant un fil électrique est de 3A/mm²

Or, nous avons utilisé du fil électrique à 0.71 mm de diamètre. Ce qui nous permet une intensité admissible maximale de 1.2 A.

Sachant que l'aimant dont on dispose a un champ magnétique au niveau de la surface latérale de 0.1 T et que le diamètre sur lequel on va enrouler notre fil est de 46mm (diamètre à la surface) :

$$N_s = \frac{F}{BIL}$$

Avec $L = \pi d_{bobine}$ (3.2)

$$N_s = \frac{30}{0.1 * 1.2 * (\pi(46)10^{-3})}$$

$$N_s = 1703.51 = 1729.95 = 1730 \text{ Spires}$$

La surépaisseur due à l'enroulement du fil de bobine est calculée comme suit :

La longueur du gabarit de la bobine sur laquelle on peut enrouler du fil est 34 mm

On a : $\frac{34}{0.71} = 47$ spires de fil par couche

On aura par la suite $\frac{1730}{47} = 37$ couches de 47 spires chacune

Sachant que l'épaisseur de chacune des couches au maximum est le diamètre du fil, la surépaisseur totale est de $37 * 0.71 = 26.27$ mm

On calcule à présent le volume occupé par le fil de bobine en vue de calculer sa masse

$$V = 2\pi r_{moy}NS \quad (3.3)$$

r_{moy} : Rayon moyen d'enroulement du fil

S : Surface de la section du fil

$$V = 2\pi \left(23 + \frac{26.27}{2}\right) * 10^{-1} * 1704 * \frac{\pi * \left(\sqrt{\frac{0.4\pi}{4}} * 0.1\right)^2}{4} = 95.46 \text{ cm}^3$$

Sachant que la masse volumique du cuivre est 8.2 g/cm^3

$$m = \rho_{Cu}V \quad (3.4)$$

$$m = 8.2 * 95.46 = 782.772 \text{ g}$$

La force de poids de la bobine sera donc égale à :

$$F_{poids} = mg \quad (3.5)$$

$$F_{poids} = 62.238 * 10^{-3} * 9.80665 = 7.67 \text{ N}$$

3.1.2- Calcul des dimensions du ressort à lames

La détermination de longueur et de l'épaisseur du ressort à lames est primordiale, car elle influe directement sur l'amplitude du mouvement de la bobine, et l'amplitude de la déformation de l'éprouvette par conséquent.

Le montage du ressort à lames au sein de notre dispositif est de type Cantilever avec charge à l'extrémité de la poutre

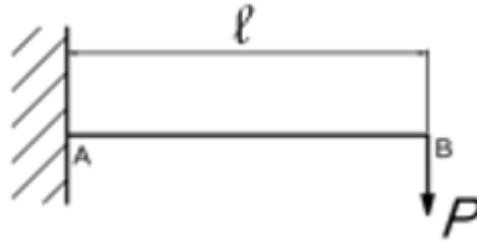


Figure 3.9 Représentation d'une poutre Cantilever et évolution du moment fléchissant tout au long de la barre

P : charge en Newton

l : longueur de la poutre (m)

E : Module d'élasticité (GPa)

I_G : Moment quadratique (m^4)

Sachant que notre ressort à lame est de type acier ressort XC70, qui a les caractéristiques suivantes :

$E=190000$ MPa

$R_e=615$ MPa

$\rho= 7700$ Kg/ m^3

Dans notre cas :

$h= 0.3$ mm

$b=20$ mm

$l= 48$ mm

Nous avons eu recours au logiciel SolidWorks pour simuler le chargement d'une des lames du ressort, nous entrons les propriétés du matériau ainsi que les conditions de chargement au niveau de l'interface du logiciel [18].

Name:

Default failure criterion:

Description:

Source:

Sustainability:

Property	Value	Units
Elastic Modulus in X	2e+011	N/m ²
Poisson's Ration in XY	0.27	N/A
Shear Modulus in XY	318900000	N/m ²
Mass Density	7700	kg/m ³
Tensile Strength in X	1158000000	N/m ²
Compressive Strength in X		N/m ²
Yield Strength	1034000000	N/m ²
Thermal Expansion Coefficient in X		/K
Thermal Conductivity in X	0.2256	W/(m-K)

Figure 3.10 Caractéristiques du matériau sur SolidWorks

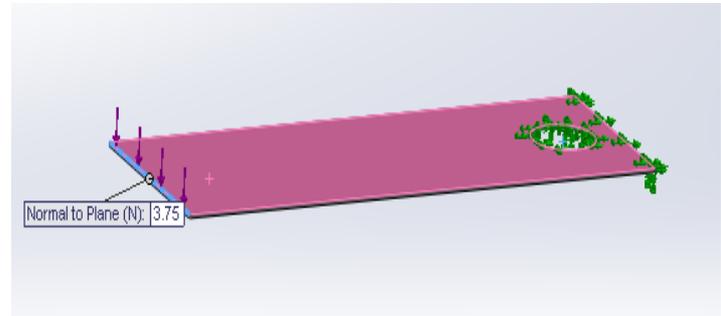


Figure 3.11 Charges (en violet) et fixation (en vert) à la lame

La charge générée par la bobine étant de 30 N, et en posant qu'on aura à utiliser 8 lames réparties axisymétriquement au niveau de l'habitacle, chacune d'entre elles subira une charge équivalente d'une intensité de 3.75 N

On obtient les résultats suivants :

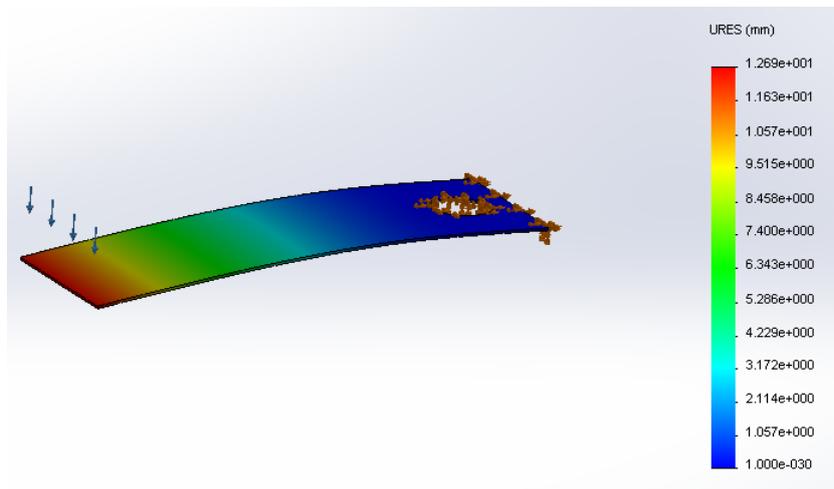


Figure 3.12 Déplacement de la lame subissant une force de 3.75 N à son extrémité

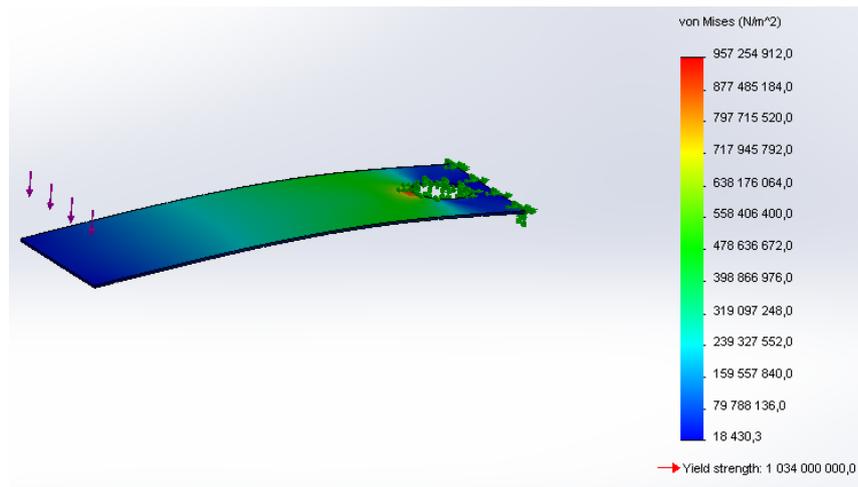


Figure 3.13 Contrainte de Von Mises sur le ressort à lames subissant une force de 3.75 N à son extrémité

On a donc une valeur de la flèche $f = 12.69 \text{ mm}$

Ce qui est une valeur de flèche acceptable et en accord avec les limites de l'amplitude des tests de fatigue, vu que la contrainte de Von Mises sur toute la lame n'atteint pas la limite élastique du matériau.

3.3- Calculs relatifs à la machine 2

Nombre de spires de l'électroaimant

Le nombre de spires est le facteur prépondérant qui va décider de l'intensité du champ magnétique résultant au niveau de l'électroaimant, et par conséquent de la force que va subir l'éprouvette pendant le fonctionnement de la machine.

Les dimensions de la bobine étaient sujettes à un nombre de contraintes vu la difficulté qu'on a rencontré pour trouver de la tôle magnétique. Nous avons finalement pu obtenir des noyaux avec des dimensions initialement fixées.

La force mécanique que va appliquer l'électroaimant à une armature qui se trouve à une distance x est donnée par la formule de Picou :

$$F = \frac{1}{2} N_s^2 I^2 \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (3.6)$$

Avec :

p : perméance [Henry]

$$p = \frac{\mu_0 \mu_r S}{l} \quad (3.7)$$

μ_r : permittivité relative d'un matériau

l : longueur du noyau ferromagnétique [m]

S : Surface totale de contact [m]

La longueur de notre noyau ferromagnétique est $l = 74\text{mm}$

La surface de contact est définie par la partie ferromagnétique qu'on devra fixer sur l'éprouvette, quel que soit le matériau la constituant, pour qu'elle soit attirée par l'électroaimant.

Relativement aux dimensions du noyau, et afin d'éviter un contact entre l'éprouvette et le fil constituant la bobine, on a jugé qu'une pate parallélépipédique de section carrée avec une surface de 900mm^2 est adéquate et permet de répondre aux critères de sécurité.

Pour une distance de l'éprouvette $x=15\text{mm}=1.5*10^{-2}$ m, et pour un fil électrique de diamètre $\phi=0.71$ mm, on calcule l'intensité de courant pouvant être tolérée par une telle section de fil :

On a la densité de courant pour un fil de section donnée est de $3\text{A}/\text{mm}^2$

Pour notre fil, on aura donc : $I = 3 * \left(\pi \frac{0.71^2}{4} \right) = 1.187 \text{ A}$

La force qu'on est censés appliquer à l'éprouvette est la même que dans le cas du pot vibrant et elle a une valeur de $F=20 \text{ N}$

A partir de l'équation (3.2), on aura donc :

$$N_{st} = \sqrt{\frac{2 * F * \Delta x * l}{I^2 * \mu_0 * \mu_r * S}} \quad (3.8)$$

La tôle magnétique qu'on a utilisée est une tôle à grains orientés, contenant 3% de Silicium environ, elle a une permittivité relative moyenne $\mu_r=93$

Sachant que la permittivité du vide a une valeur de $1.25*10^{-6}$, on aura donc :

$$N_{st} = \sqrt{\frac{2 * 20 * 1.5 * 10^{-2} * 74 * 10^{-3}}{1.187^2 * 1.25 * 10^{-6} * 93 * 1.14 * 10^{-3}}} = 487.63$$

Un rendement d'électroaimant est considéré, et qui prendra en compte les pertes par effet joule ainsi que les effets du courant de Foucault, il est estimé à $\eta_e=0.87$

On aura le nombre de spires nécessaire pour la conception de notre électroaimant qui sera égal à :

$$N_s = \frac{487.63}{0.87} = 560.49 = 561 \text{ Spires}$$

3.4- Description des machines

3.4.1- Description de la Machine 1

Pour ce qui est du pot vibrant, il est doté de plusieurs composants, chacun d'entre eux occupe un rôle primordial dans le fonctionnement de la machine.

Il est doté d'un nombre de ressorts à lames qui ont pour rôle d'amortir le mouvement de l'armature provoqué par la force de Laplace générée au niveau de la bobine, et de créer une force de rappel assurant le mouvement sinusoïdal qui caractérise les tests de contraintes à sollicitations alternées.

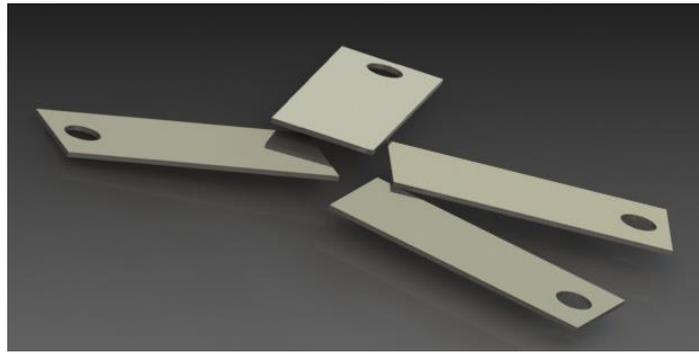


Figure 3.14 Ressort à lames

La bobine est bien évidemment celle qui provoque le mouvement initialement, lorsqu'elle est parcourue par le courant. Elle transmet le mouvement à l'armature qui est liée à la bobine ainsi qu'à l'habitacle extérieur via les lames ressort

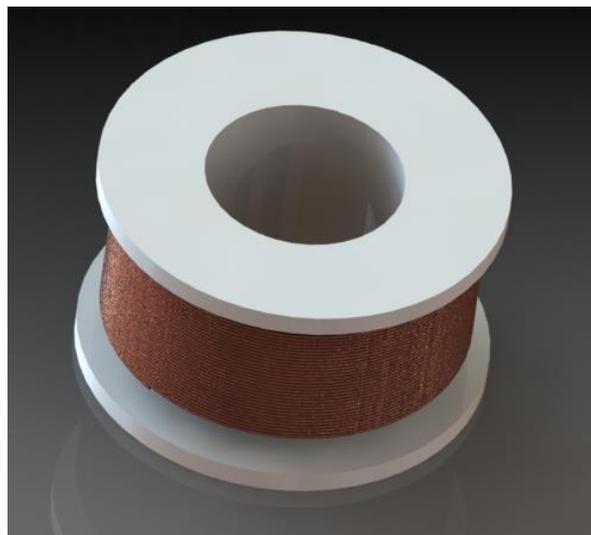


Figure 3.15 Bobine

L'armature est dotée de la forme représentée sur la figure suivante :

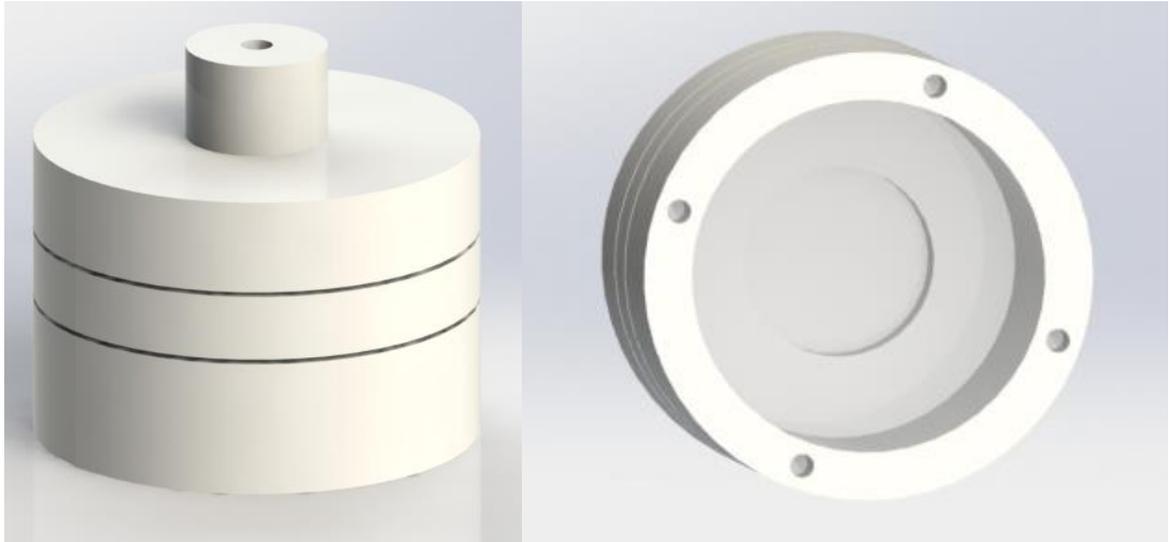


Figure 3.16 Armature en perspective et vue de dessous

La bobine se trouve logée au niveau de l'armature, et est bloquée à l'intérieur de cette dernière par le biais d'une butée qui fixée par le biais de vis

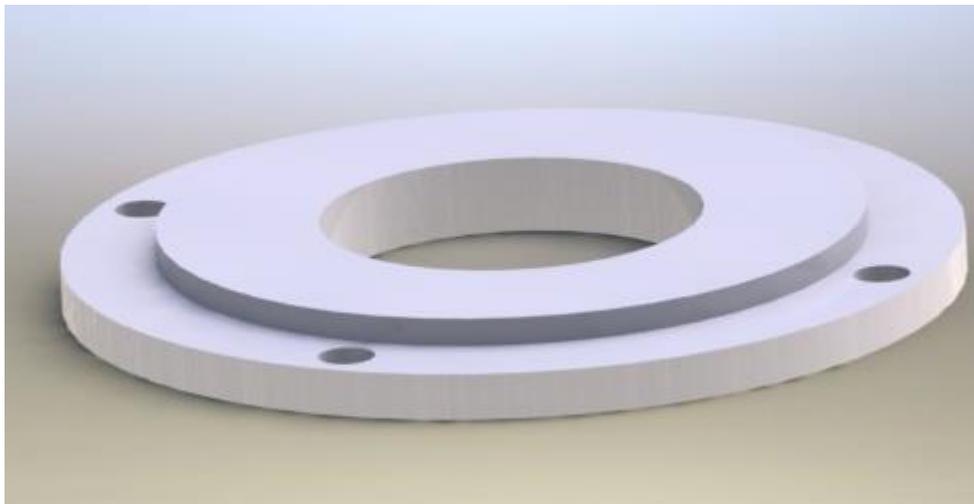


Figure 3.17 Butée

L'aimant que nous avons utilisé et qui va créer le champ magnétique permanent participant dans la génération du mouvement de la bobine est de la forme suivante :



Figure 3.18 Aimant permanent 0,1T

3.4.2- Description de la Machine 2

La Machine 2 est constituée de deux bobines positionnées sur des rails sur lesquels elles glissent horizontalement, ce qui permet d'avoir une flexibilité par rapport aux différentes éprouvettes existant dans l'industrie.

Les composants proches de la bobine sont en aluminium pour prévenir les vibrations qui pourraient être causées lors du fonctionnement de la machine.

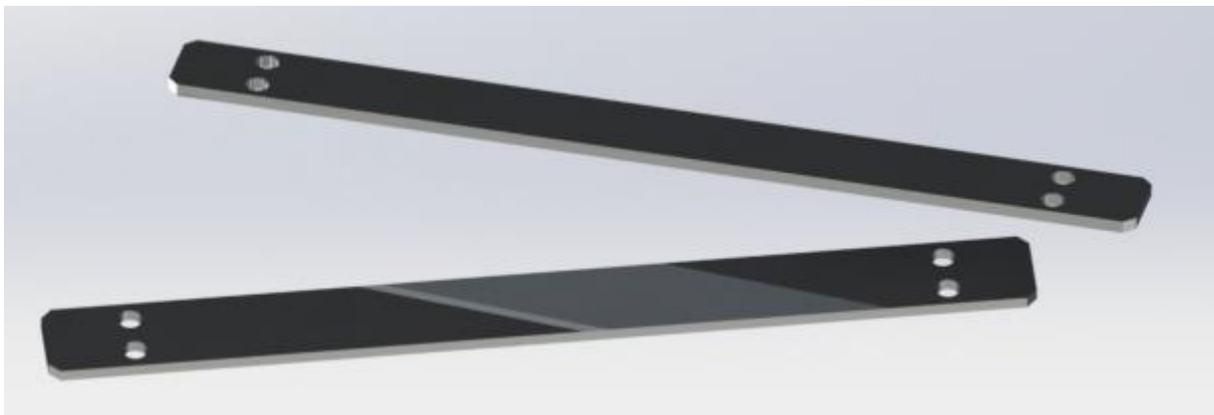


Figure 3.19 Barres constituant les rails

La base de la machine comporte des perçages permettant de fixer l'étau de serrage ainsi que deux barres qui supporteront le reste des composants



Figure 3.20 La base de la machine, avec l'étau et les barres dessus

Les bobines sont positionnées verticalement par rapport à l'étau par le moyen de brides qui se déplacent tout au long des barres et qui sont serrées à la hauteur voulue dépendant des dimensions de l'éprouvette.

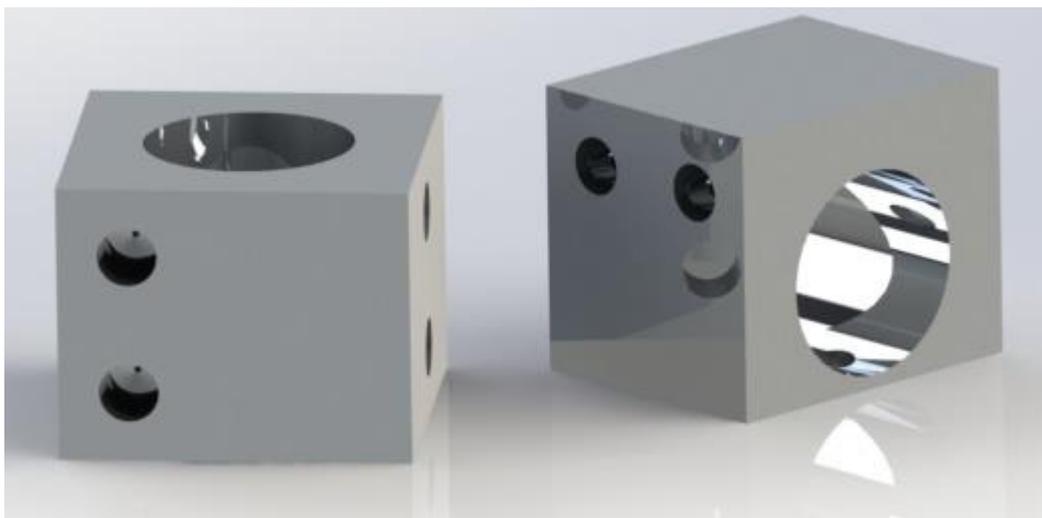


Figure 3.21 fixations des rails

L'ensemble bobine-entrefer est fixé sur un support qui glisse sur les rails via des glissières permettant de supporter et assurer l'alignement des éléments

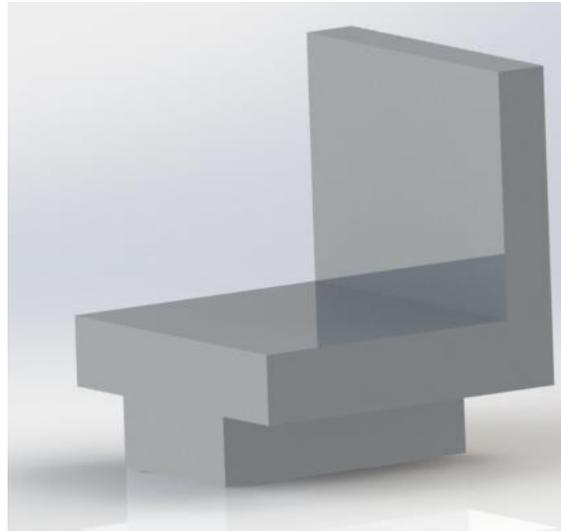


Figure 3.22 Glissière et support bobine

Pour la bobine et l'entrefer, on a décidé de recourir aux éléments de contacteurs électriques qui sont reconnus pour leur puissance et leur durabilité, choses qui assureront le bon fonctionnement de la machine ainsi que nos tests.

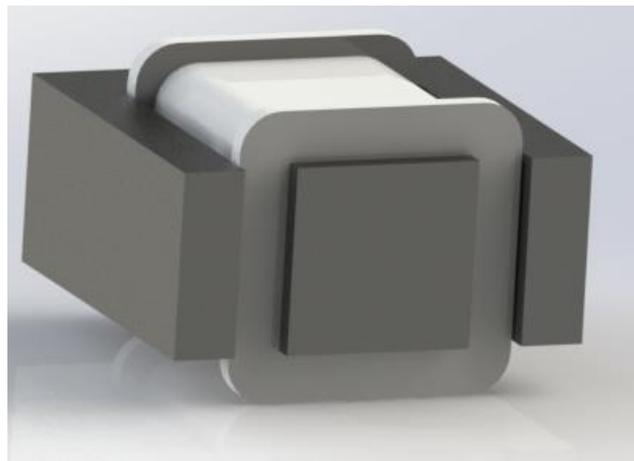


Figure 3.23 Bobine avec entrefer en forme de E

Une fois notre conception finalisée, nous avons réalisé nos deux machines. Ces dernières sont illustrées ci-dessous :

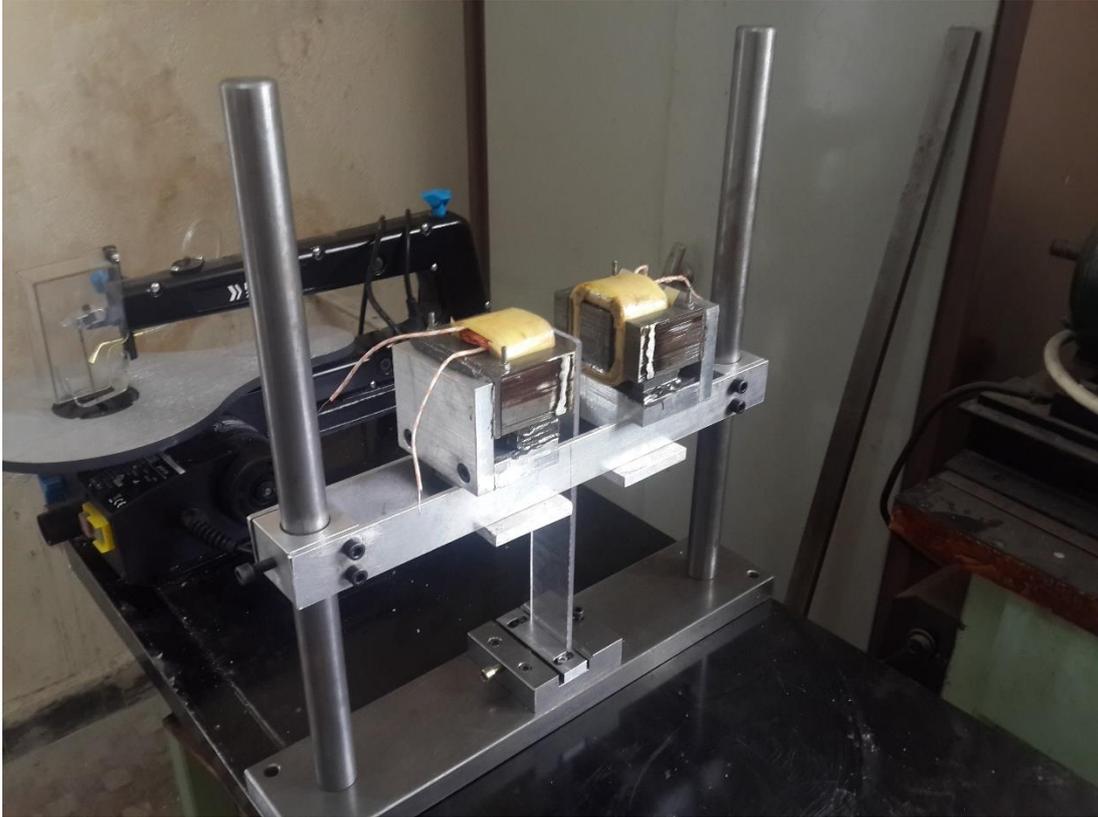


Figure 3.24 Machine de fatigue (Machine 2)



Figure 3.25 Machine 2 vue coté électroaimants



Figure 3.26 Machine 2 avec armoire de commande électronique

Conclusion générale

La prévision et la détermination de la durée de vie en fatigue est au centre des recherches actuelles, aujourd'hui plus que jamais, au vu des enjeux économiques et le fait que des vies humaines font partie des dégâts collatéraux.

Ce projet d'études qui a traité de la conception et réalisation d'une machine de fatigue a été, en l'occurrence, très bénéfique. Car ce dernier a servi de fenêtre donnant sur le travail d'ingénieur et le monde du travail dans le domaine de la conception en général. Ceci inclue les contraintes qui peuvent être rencontrées et les embûches guettant à chaque étape de notre démarche, ainsi que les différentes étapes constituant le processus de fabrication d'une machine. Des calculs d'éléments fonctionnels à la conception assistée par ordinateur, en passant par l'approvisionnement et la logistique, cela aboutit à un produit fini qui répond aux critères posés au début du projet.

Le travail réalisé lors de la préparation de ce projet de fin d'études n'est, certes, pas exempt de tout reproche. Il constitue un travail de recherche qui ouvre le champ à d'autres qui vont suivre, chacun d'entre eux apportant son lot d'améliorations jusqu'à aboutir à une machine représentant fidèlement le principe qui est stipulé dans l'intitulé du projet.

Il serait intéressant, néanmoins, de mettre ces machines à la disposition des étudiants. Que ce soit sous forme de partie introductrice à la fatigue, ou bien que ce soit intégré à l'ensemble des travaux pratiques exécutés au long de l'année universitaire pour traiter les phénomènes vibratoires.

La première machine réalisée peut être exploitée immédiatement pour réaliser des tests de vibrations sur petites lames et petites plaques pour étudier leurs modes propres. Elle peut être améliorée pour l'étude de la fatigue en ajoutant un accessoire de fixation jouant le rôle d'encastrement.

La deuxième machine qui utilise deux électroaimants est exploitable et possède plusieurs avantages. Elle permet de :

- Faire des essais de fatigue en flexion plane
- Quantifier les forces électromagnétiques sur une éprouvette entre deux électroaimants

- Faire des essais de vibration
- En ajoutant un étau supérieur, cette machine pourra traiter des essais sur éprouvette en combinant plusieurs appuis.
- L'originalité de cette machine permet de faire varier la position des électroaimants horizontalement et verticalement. Ceci permet de faire des essais sur des éprouvettes de différentes formes et différentes longueurs.
- La machine a l'avantage de réaliser des essais sur différents types de matériaux métalliques et non métalliques.

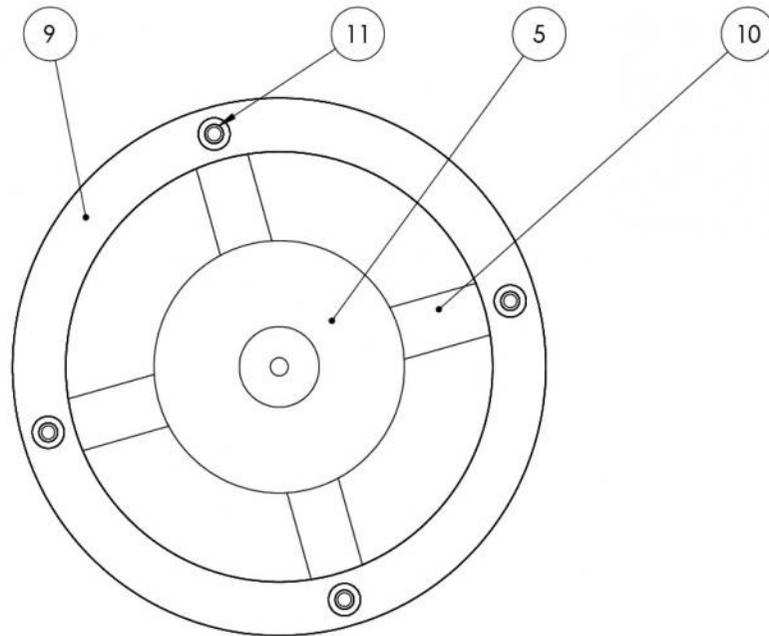
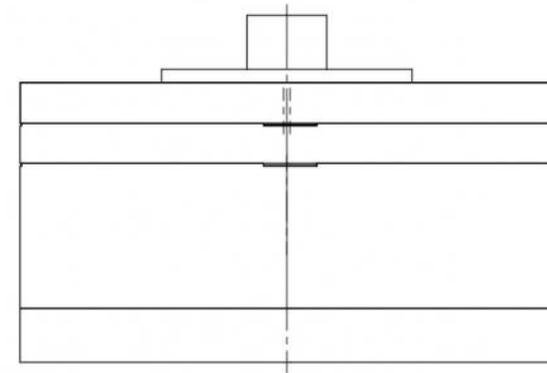
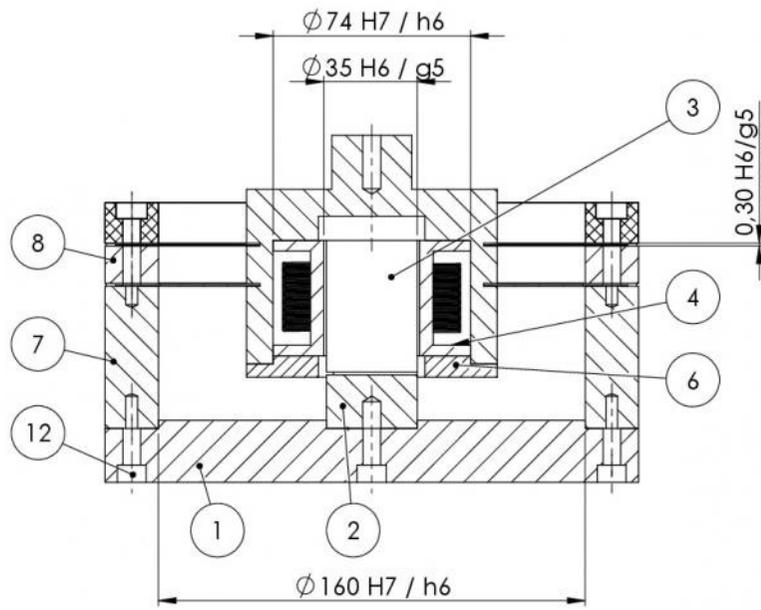
Bibliographie

- [1] Méthodes de mesure d'endurance en fatigue, disponible sur http://materiaux2005.free.fr/ODM/MDM3_1.pdf (15/06/2016)
- [2] P. Bonnet, « Fatigue des métaux », Supméca 3 matériaux et procédés, 2004
- [3] J. A. Ewing et J. C. W. Humfrey, « The fracture of metals under repeated alternations of stress », Proceedings of the Royal Society of London (1854-1905), vol. 71, 1903
- [4] A. Hadj Bouzid, F. Hadid, « Conception et réalisation d'une machine de fatigue en torsion couplée à la flexion », projet de fin d'études ENP 2015
- [5] Bathias, C., Pineau, A. « Fatigue des matériaux et des structures, vol.1. », 2008
- [6] A.D. Deutschman; W.J. Michels; C.E. Wilson «Machine Design: Theory and Practice» Macmillan PuB. Inc., 1975
- [7] Krupp Ulrich «Fatigue Crack Propagation in Metals and Alloys » Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. 2007
- [8] Le champ magnétique, Wikipédia, 2007
https://fr.wikipedia.org/wiki/Champ_magnétique (15/06/2016)
- [9] C. Divoux, Notions d'électromagnétisme, 2006. <http://www.physique-appliquee.net/physique/electromagnetisme.php> (15/06/2016)
- [10] H. Corbin, Forces électromagnétiques-force de Laplace-couplage électromécanique, 2009
Disponible sur <http://harold.corbin.perso.sfr.fr/premiers/coursphysique/> (15/06/2016)
- [11] Lycée polyvalent Jay de Belfort, « Electromagnétisme et loi de Laplace », 2012
http://webtab.acbordeaux.fr/Etablissement/LJay/pedagogie/disciplines/phychi/physique/TSTL/Docs/TSTL_SEQUENCE_09_%20Force_Laplace.pdf (15/06/2016)
- [12] M. Blétry, « Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux », 2006
http://mms2.mines-paristech.fr/mms_paris/experimental/polycop/caracterisation.pdf
- [13] B. Bouet, S. M. Kerneis, C. A. C. Pagnon, E. Christian, Procédé de caractérisation mécanique d'un matériau métallique, 2006
<http://www.google.com/patents/EP1696220A1?cl=fr> (16/06/2016)

- [14] D.M. Harris, J.W.M. Bush / Journal of Sound and Vibration 334, 2015
- [15] P. Cornu, « Essais en vibrations ». Mesures, 2005
www.mesures.com/pdf/old/773mesuresmecaniques.pdf (15/06/2016)
- [16] A.L. Dias, R. E. R. Menuzzo, «Magnetic field and force identification of commercial magnets for building electromagnetic shakers», ABCM Symposium Series in Mechatronics - Vol. 3, 2008
- [17] K. Meliani, « Expérimentation et simulation de la fatigue en flexion plane alternée sur du PMMA », mémoire de Master, ENP, 2015
- [18] Steeless special steel suppliers, Carbon steel tables, 2011
<http://www.steelss.com/Carbon-steel/aisi-1069-carbon-steel.html> (15/06/2016)

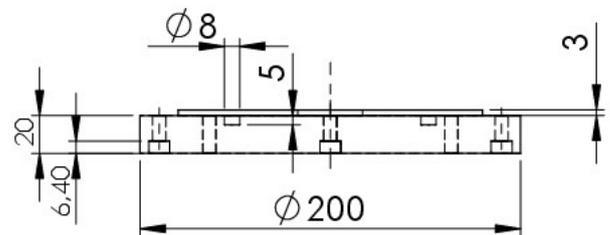
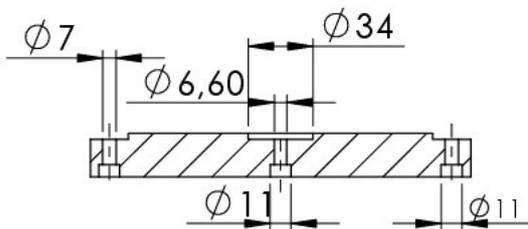
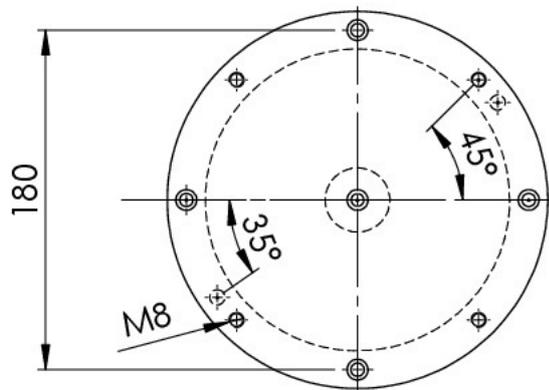
ANNEXES

ANNEXE A



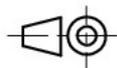
12	4	Vis CHC M6 X 25	Inox classe 14.9
11	5	Vis CHC M6 X 30	Inox classe 12.9
10	8	Ressort à lames	XC70
9	1	Partie latérale N°3	Al Cu 4 Mg Si
8	1	Partie latérale N°2	Al Cu 4 Mg Si
7	1	Partie latérale N°1	Al Cu 4 Mg Si
6	1	Butée de bobine	Polyamide PA 11
5	1	Armature	Polyamide PA 11
4	1	Gabarit de bobine	Polyamide PA 11
3	1	Aimant	Degré Y10T
2	1	Support d'aimant	Al Cu 4 Mg Si
1	1	Base machine	Al Cu 4 Mg Si
N°	Qté.	DESIGNATION	MATIERE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			E.N.P G.MECANIQUE
ECHELLE: 1:2			
		Machine 1	
ETUDIANT	TOUAHRI		
PROMOTEUR	BELKACEMI		
PROMOTEUR	GUERGUEB		



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

ECHELLE: 1:4



BASE MACHINE

**E.N.P
G.MECANIQUE**

ETUDIANT

TOUAHRI

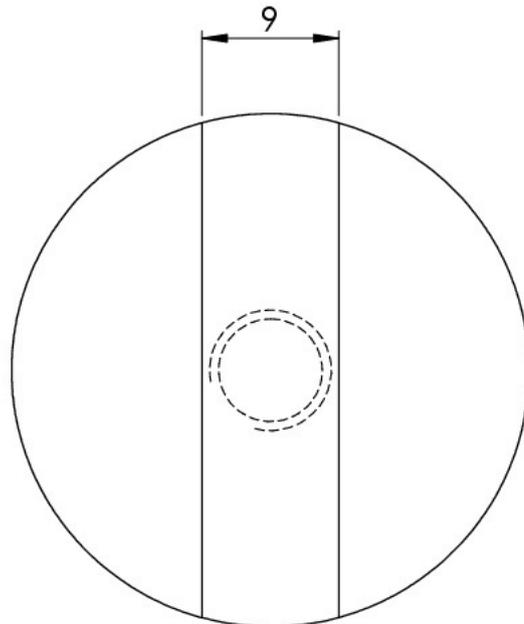
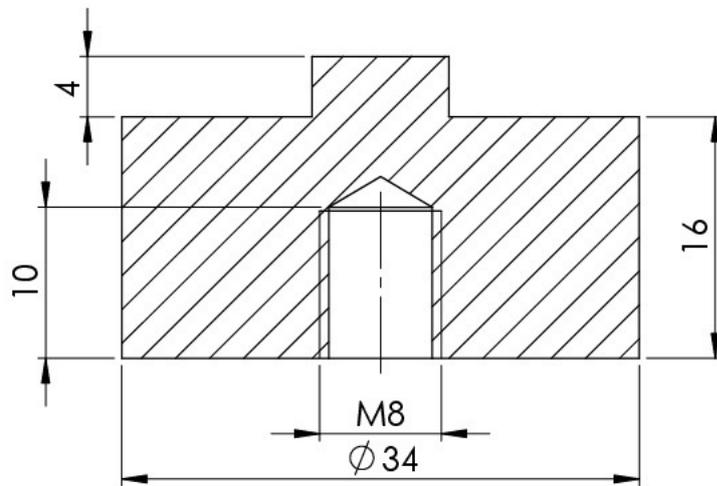
PROMOTEUR

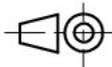
BELKACEMI

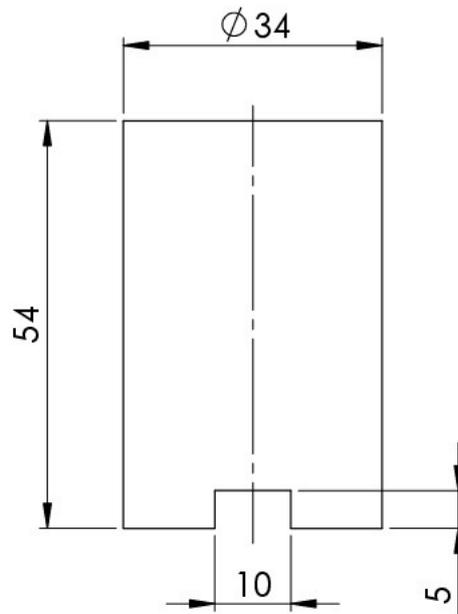
PROMOTEUR

GUERGUEB

MATERIAU:
AlSi7Mg0.6

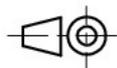


ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			E.N.P G.MECANIQUE
ECHELLE: 2:1		SUPPORT AIMANT	
ETUDIANT	TOUAHRI	MATERIAU: ALSi7Mg0.6	
PROMOTEUR	BELKACEMI		
PROMOTEUR	GUERGUEB		



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

ECHELLE: 1:1



AIMANT

**E.N.P
G.MECANIQUE**

ETUDIANT

TOUAHRI

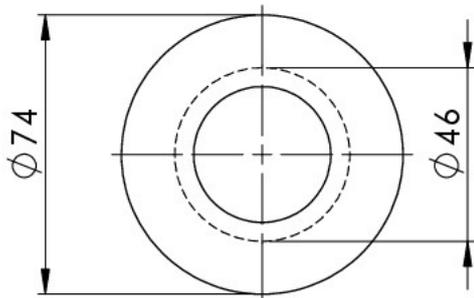
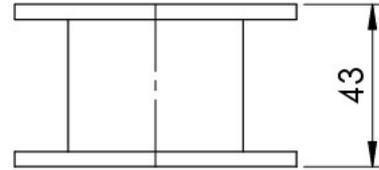
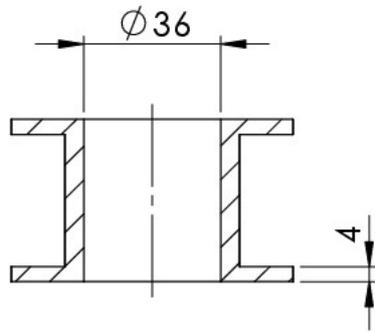
PROMOTEUR

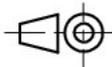
BELKACEMI

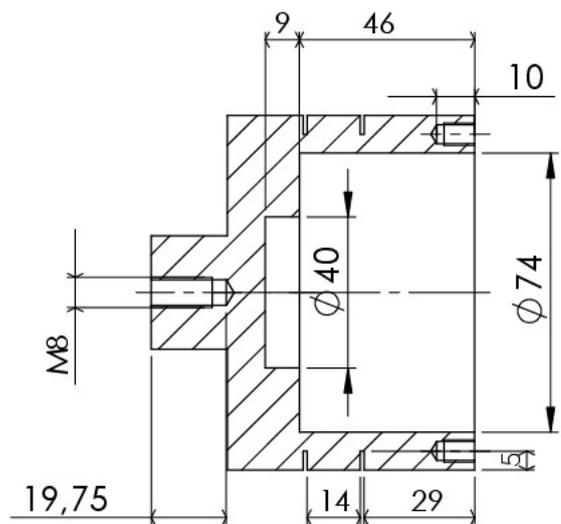
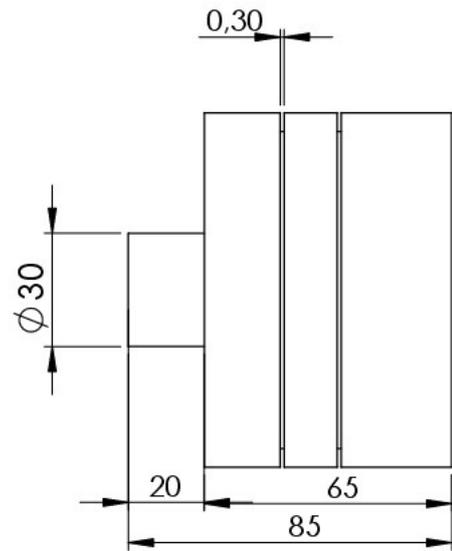
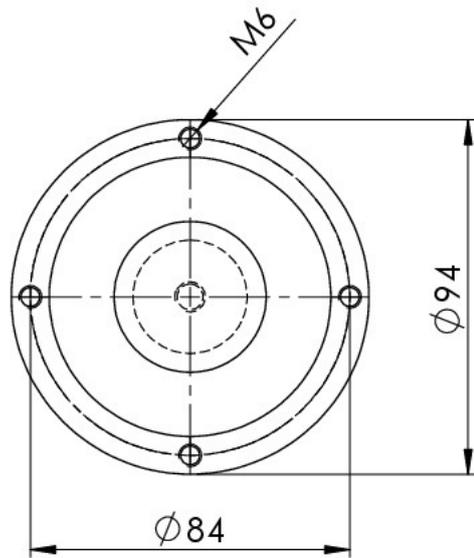
PROMOTEUR

GUERGUEB

MATERIAU:
Ferrite degré Y10T

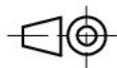


ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			E.N.P G.MECANIQUE
ECHELLE: 1:2		GABARIT BOBINE	
ETUDIANT	TOUAHRI	MATERIAU: POLYAMIDE PA11	
PROMOTEUR	BELKACEMI		
PROMOTEUR	GUERGUEB		



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

ECHELLE: 1:2



ARMATURE

**E.N.P
G.MECANIQUE**

ETUDIANT

TOUAHRI

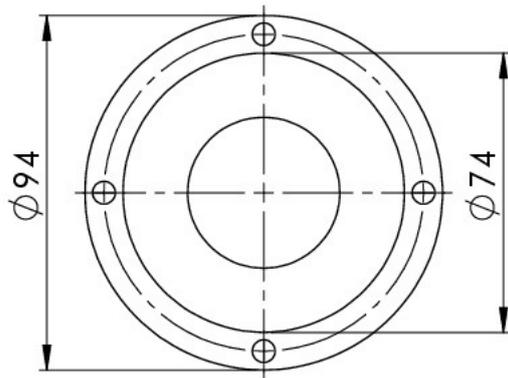
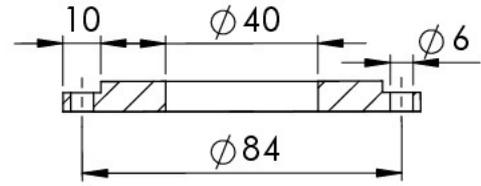
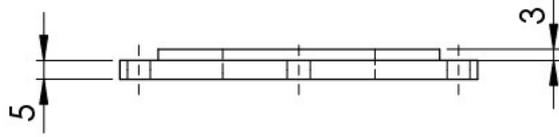
PROMOTEUR

BELKACEMI

PROMOTEUR

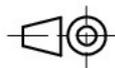
GUERGUEB

MATERIAU:
POLYAMIDE PA11



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

ECHELLE: 1:2



BUTEE DE BOBINE

**E.N.P
G.MECANIQUE**

ETUDIANT

TOUAHRI

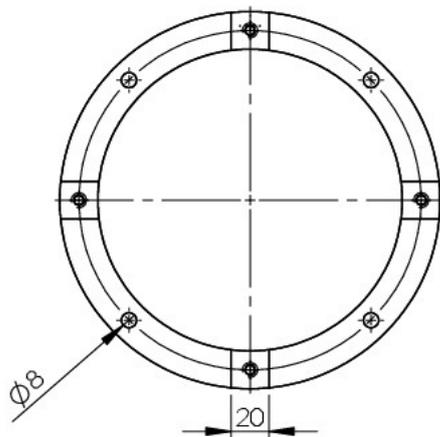
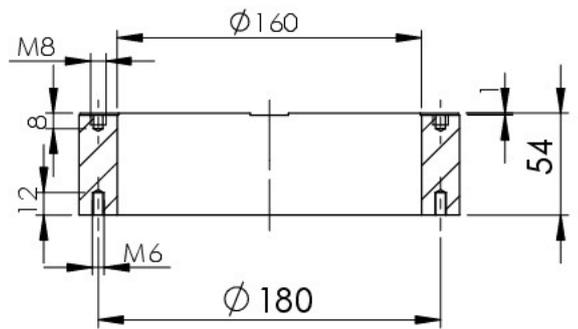
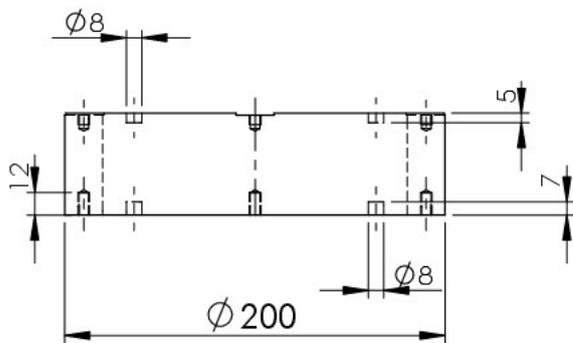
PROMOTEUR

BELKACEMI

PROMOTEUR

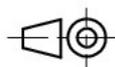
GUERGUEB

MATERIAU:
POLYAMIDE PA11



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

ECHELLE: 1:4



PARTIE LATÉRALE 1

**E.N.P
G.MECANIQUE**

ETUDIANT

TOUAHRI

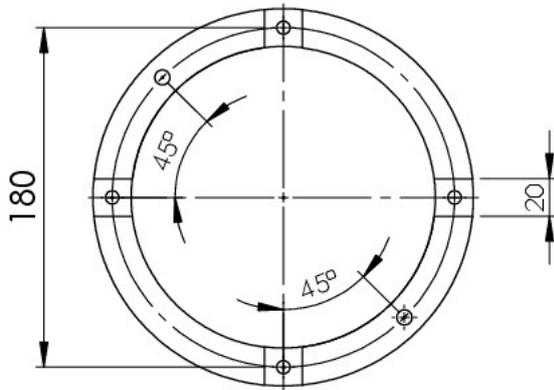
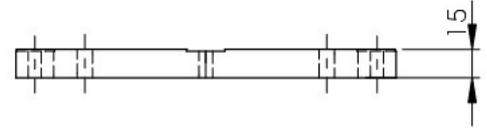
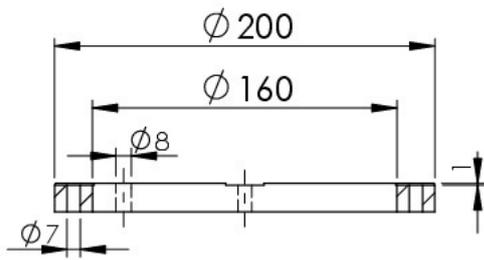
PROMOTEUR

BELKACEMI

PROMOTEUR

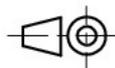
GUERGUEB

MATERIAU:
AlSi7Mg0.6



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

ECHELLE: 1:4



PARTIE LATÉRALE 2

**E.N.P
G.MECANIQUE**

ETUDIANT

TOUAHRI

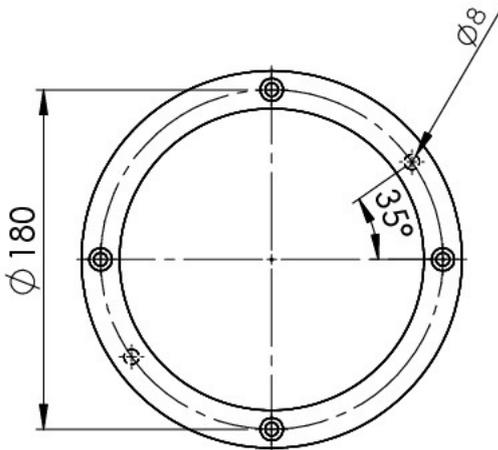
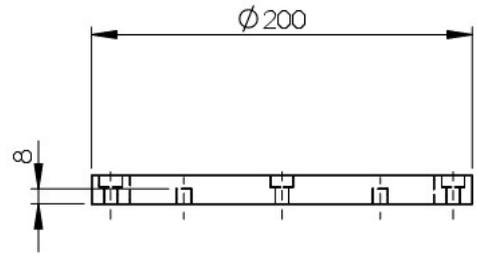
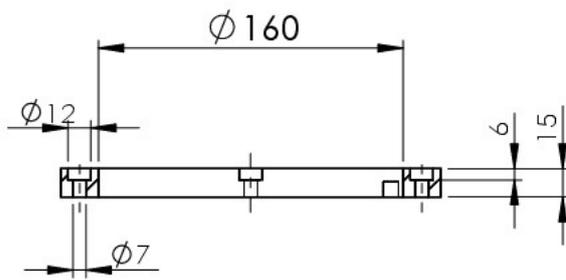
PROMOTEUR

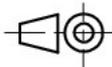
BELKACEMI

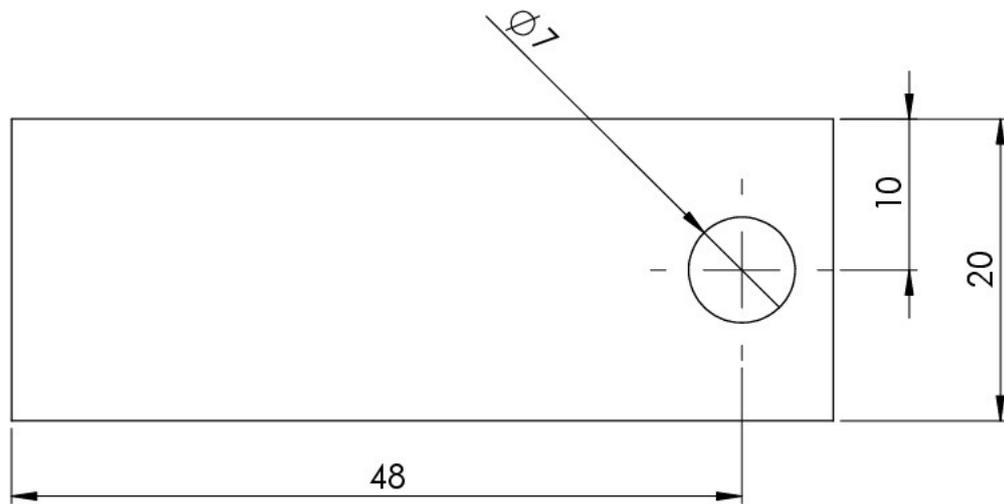
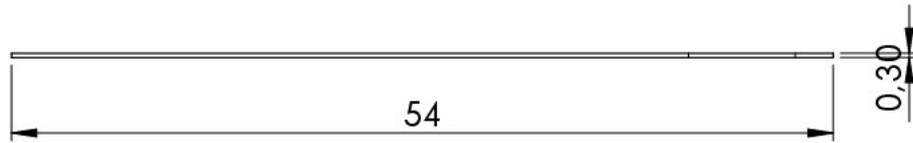
PROMOTEUR

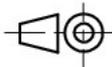
GUERGUEB

MATERIAU:
AlSi7Mg0.6

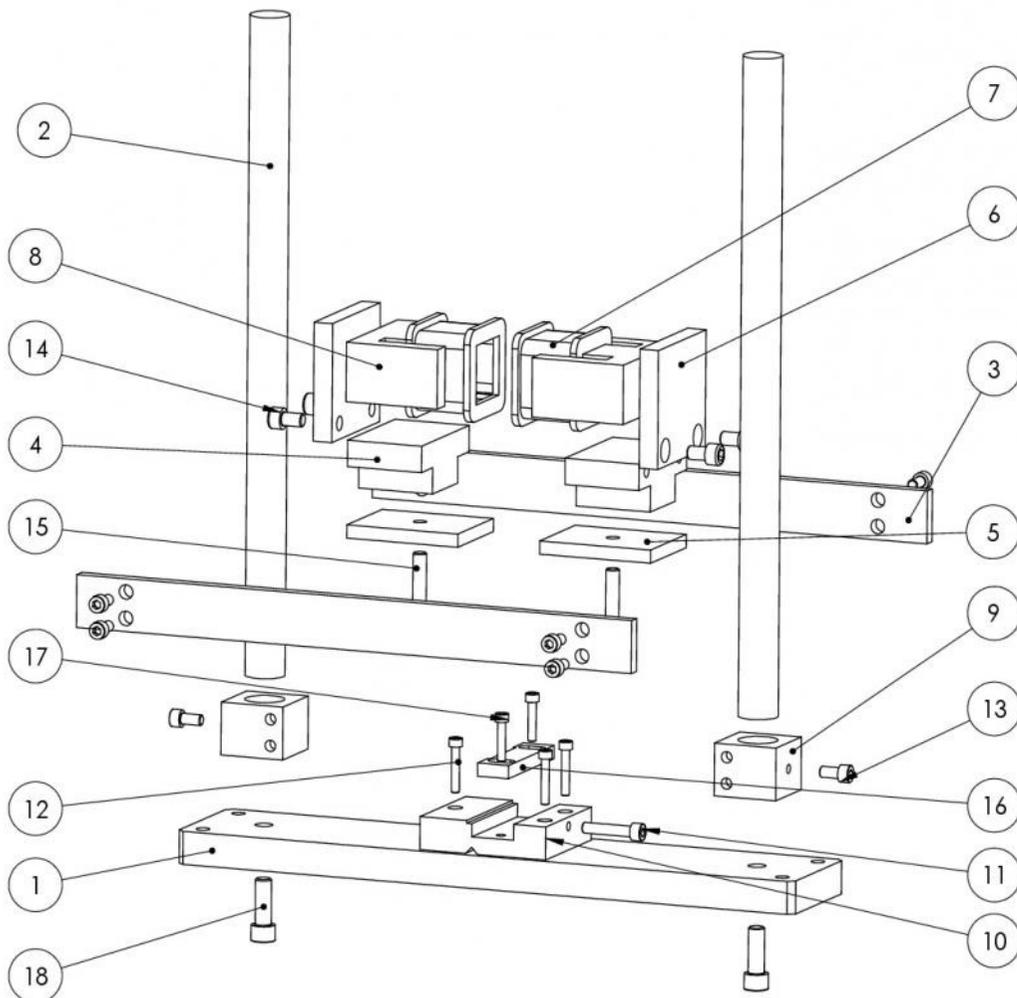
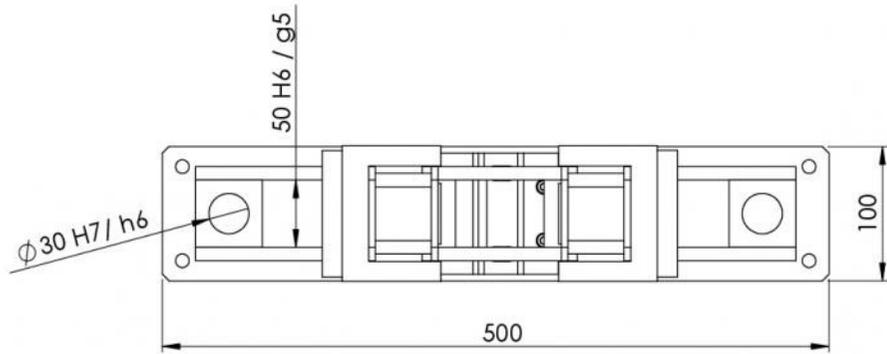


ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			E.N.P G.MECANIQUE
ECHELLE: 1:4		PARTIE LATERALE 3	
ETUDIANT	TOUAHRI	MATERIAU: AlSi7Mg0.6	
PROMOTEUR	BELKACEMI		
PROMOTEUR	GUERGUEB		



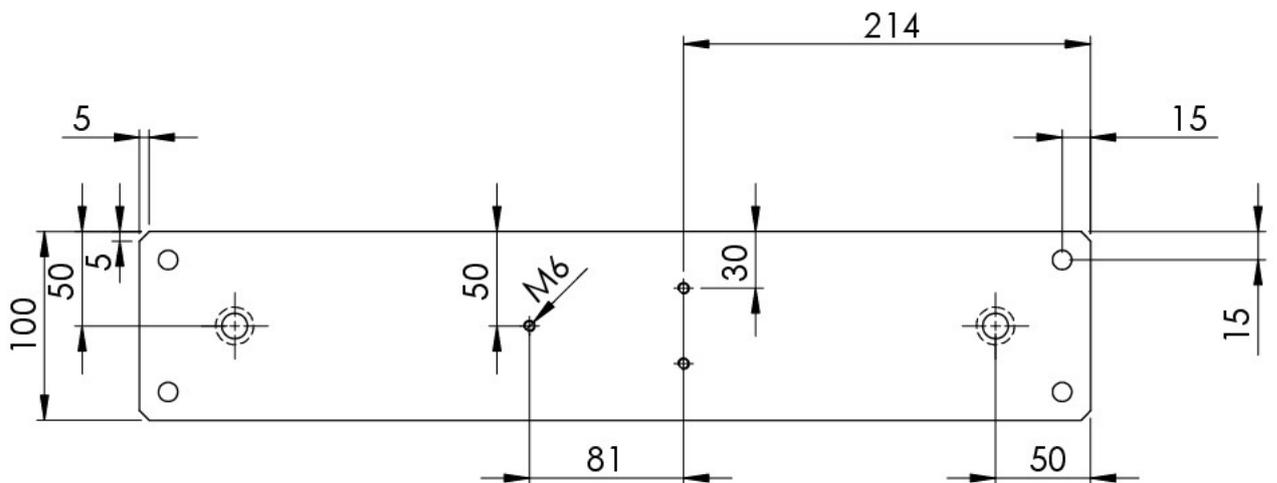
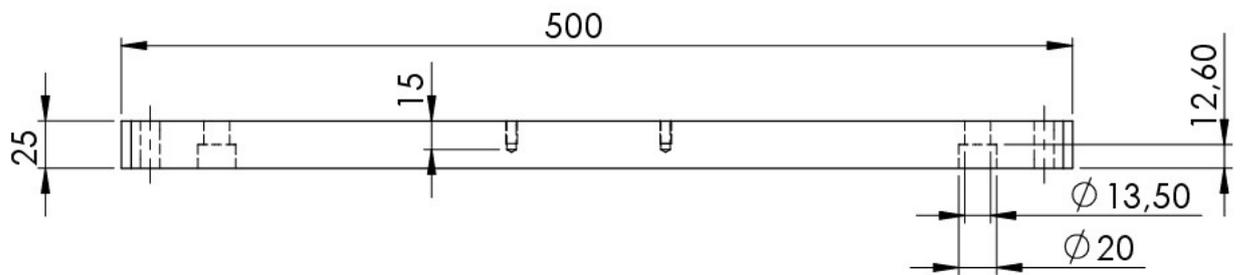
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			E.N.P G.MECANIQUE
ECHELLE: 2:1		RESSORT A LAMES	
ETUDIANT	TOUAHRI	MATERIAU: ACIER XC70	
PROMOTEUR	BELKACEMI		
PROMOTEUR	GUERGUEB		

ANNEXE B



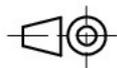
18	2	Vis CHC M12 x 35	Classe 10.9
17	2	Vis CHC M6 x 30	Classe 12.9
16	1	Mor d'étou	Acier A 33 calibré
15	2	Vis CHC M10 x 50	Classe 6.8
14	4	Vis CHC M10 x 16	Classe 8.8
13	10	Vis CHC M8 x 16	Classe 12.9
12	3	Vis CHC M6 x 35	Classe 10.9
11	1	Vis CHC M8 x 40	Classe 12.9
10	1	Base d'étou	Acier A 33 calibré
9	2	Fixation rails	AlSi7Mg0,6
8	2	Noyau ferromagnétique	Acier M 111-35 N
7	2	Bobine	CuNi2Si
6	2	Support bobine 3	AlSi7Mg0,6
5	2	Support bobine 1	AlSi7Mg0,6
4	2	Support bobine 2	AlSi7Mg0,6
3	2	Barre rails	AlSi7Mg0,6
2	2	Barre montant	Acier A33
1	1	Base de machine	Acier A 33
N°	Qté.	DESIGNATION	MATIERE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			E.N.P G.MECANIQUE
ECHELLE: 1:4			
ETUDIANT	TOUAHRI		
PROMOTEUR	BELKACEMI		
PROMOTEUR	GUERGUEB		



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

ECHELLE: 1:4



BASE MACHINE

E.N.P
G.MECANIQUE

ETUDIANT

TOUAHRI

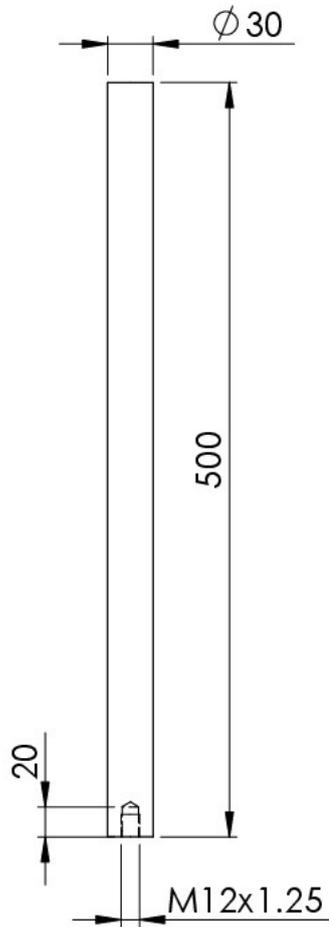
PROMOTEUR

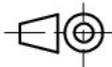
BELKACEMI

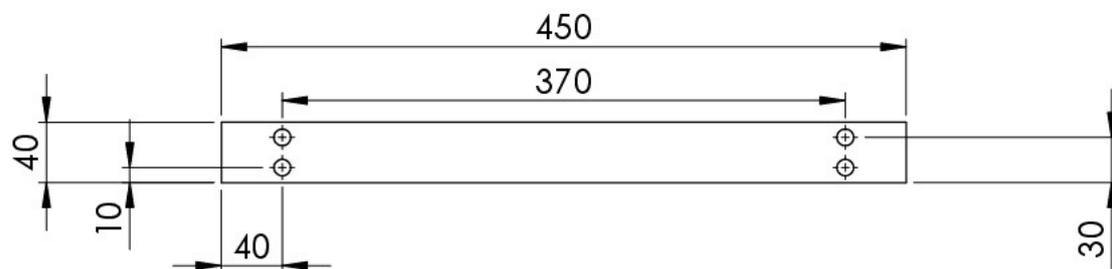
PROMOTEUR

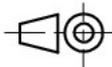
GUERGUEB

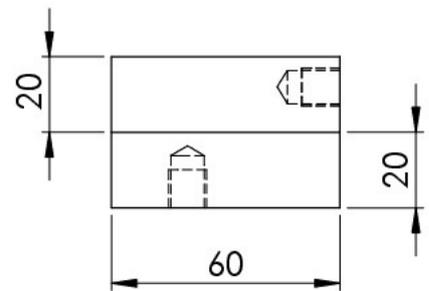
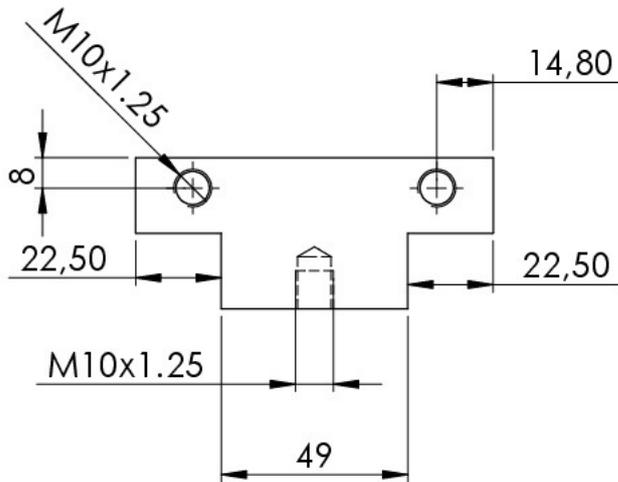
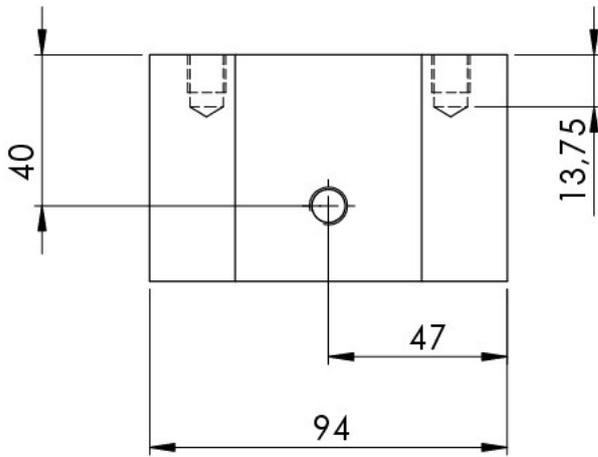
MATERIAU:
ACIER A33 CALIBRE



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			E.N.P G.MECANIQUE
ECHELLE: 1:5		BARRE MONTANT	
ETUDIANT	TOUAHRI	MATERIAU: ACIER A33 CALIBRE	
PROMOTEUR	BELKACEMI		
PROMOTEUR	GUERGUEB		

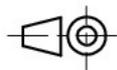


ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			E.N.P G.MECANIQUE
ECHELLE: 1:5		BARRE RAILS	
ETUDIANT	TOUAHRI	MATERIAU: AlSi7Mg0.6	
PROMOTEUR	BELKACEMI		
PROMOTEUR	GUERGUEB		



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

ECHELLE: 1:2



**SUPPORT BOBINE
N°2**

**E.N.P
G.MECANIQUE**

ETUDIANT

TOUAHRI

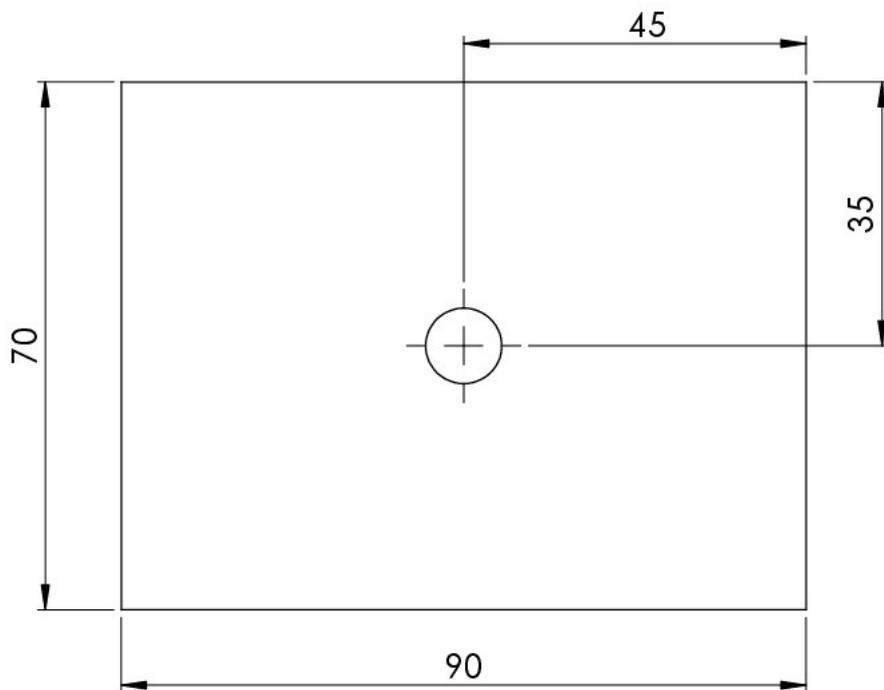
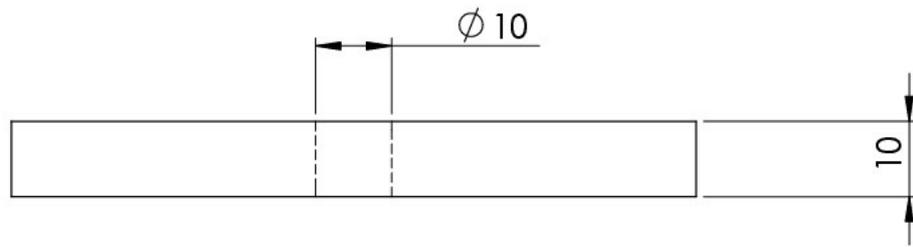
PROMOTEUR

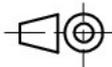
BELKACEMI

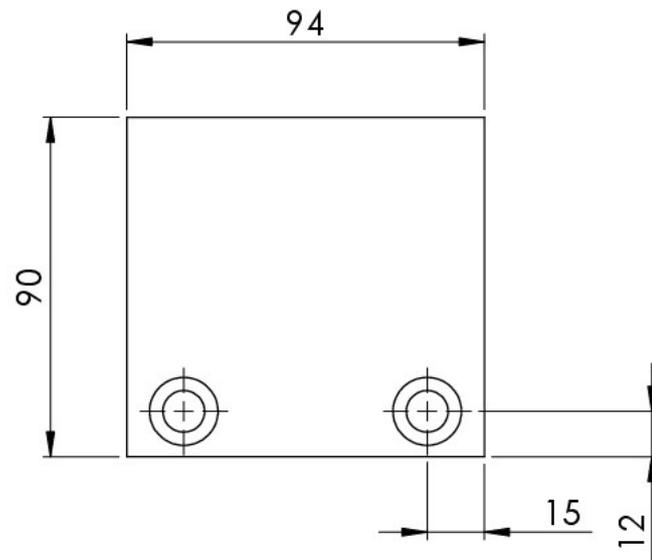
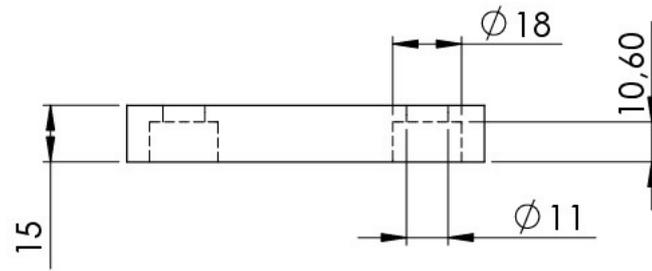
PROMOTEUR

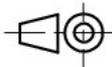
GUERGUEB

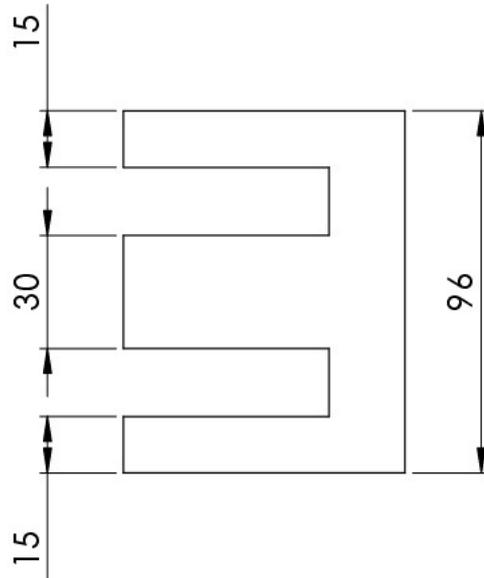
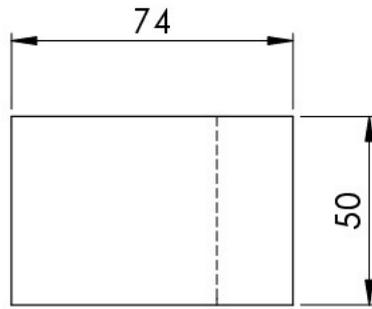
MATERIAU:
AlSi7Mg0.6

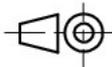


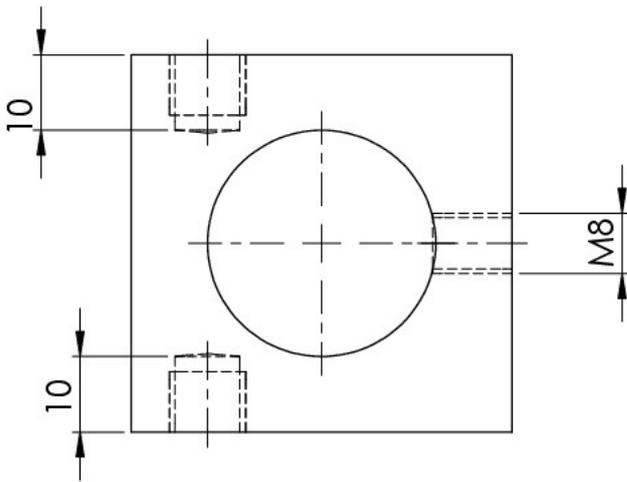
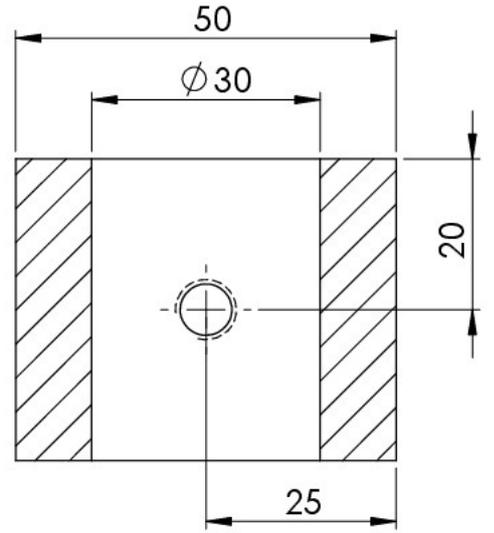
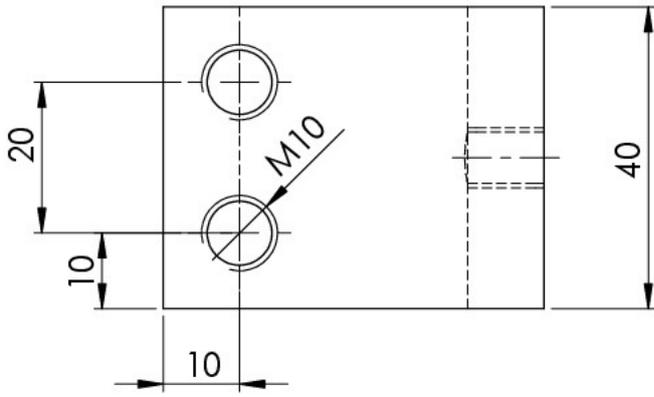
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			E.N.P G.MECANIQUE
ECHELLE: 1:1		SUPPOT BOBINE N°1	
ETUDIANT	TOUAHRI	MATERIAU: AlSi7Mg0.6	
PROMOTEUR	BELKACEMI		
PROMOTEUR	GUERGUEB		

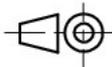


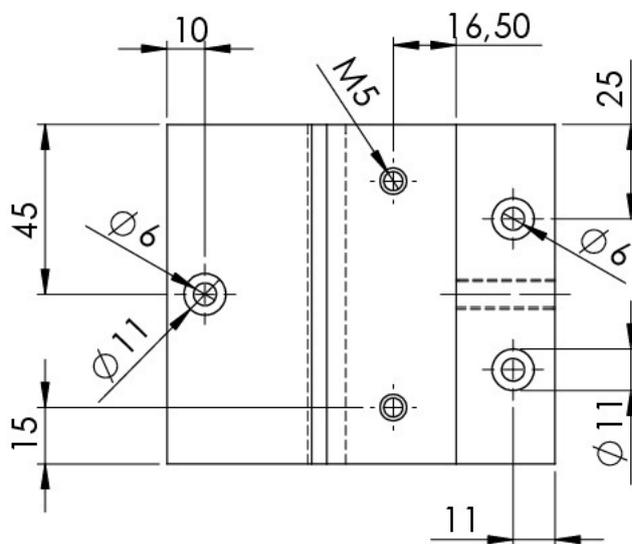
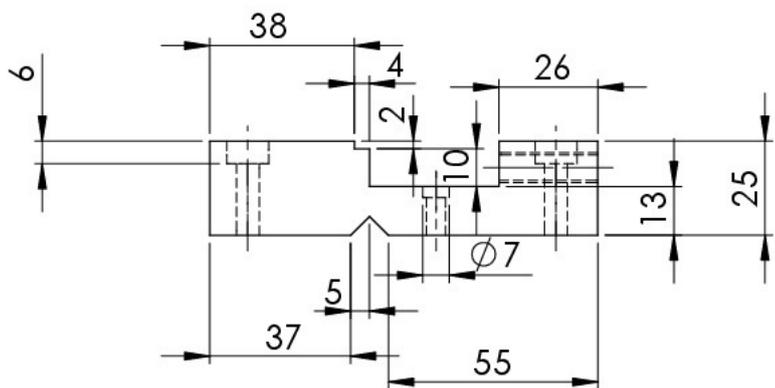
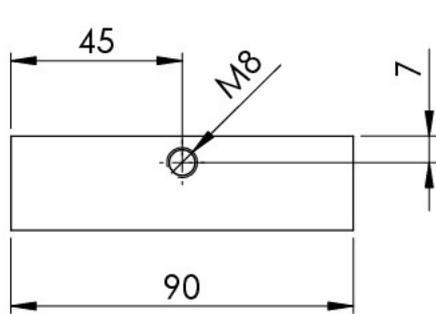
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			E.N.P G.MECANIQUE
ECHELLE: 1:2		SUPPORT BOBINE N°3	
ETUDIANT	TOUAHRI	MATERIAU: AlSi7Mg0.6	
PROMOTEUR	BELKACEMI		
PROMOTEUR	GUERGUEB		

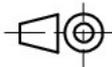


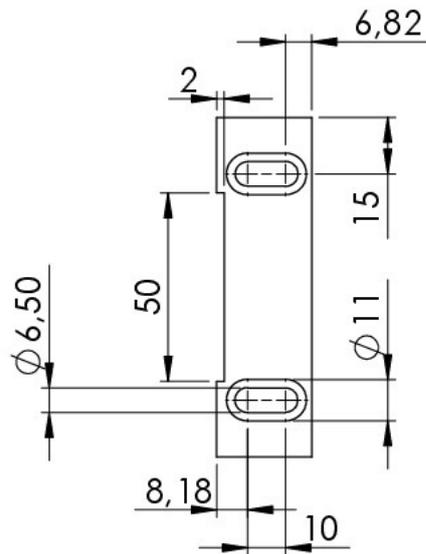
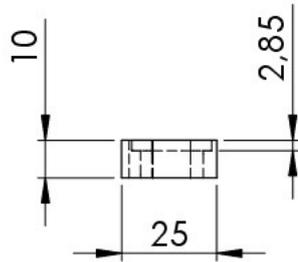
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			E.N.P G.MECANIQUE
ECHELLE: 1:2		NOYAU FERROMAGNETIQUE	
ETUDIANT	TOUAHRI	MATERIAU: ACIER M 111-35 N	
PROMOTEUR	BELKACEMI		
PROMOTEUR	GUERGUEB		



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			E.N.P G.MECANIQUE
ECHELLE: 1:1		FIXATION DE RAILS	
ETUDIANT	TOUAHRI	MATERIAU: AlSi7Mg0.6	
PROMOTEUR	BELKACEMI		
PROMOTEUR	GUERGUEB		



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			E.N.P G.MECANIQUE
ECHELLE: 1:2		BASE D'ETAU	
ETUDIANT	TOUAHRI	MATERIAU: ACIER A33 CALIBRE	
PROMOTEUR	BELKACEMI		
PROMOTEUR	GUERGUEB		



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			E.N.P G.MECANIQUE
ECHELLE: 1:2		MOR D'ETAU	
ETUDIANT	TOUAHRI	MATERIAU: ACIER A33 CALIBRE	
PROMOTEUR	BELKACEMI		
PROMOTEUR	GUERGUEB		