

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique
Laboratoire de Génie Mécanique

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

Conception et réalisation d'une centrifugeuse à fond tournant

Mohammed Amokrane BOUMZOU

Sous la direction de M. Djamel SAIDI Maitre de conférences (B)

Présenté et soutenu publiquement le (06/07/2019)

Composition du Jury :

Président M .Mohamed BOUAZIZ, Professeur Ecole Nationale Polytechnique

Examineur M .Brahim GUERGUEB, Maitre-assistant (A) Ecole Nationale Polytechnique

Promoteur M. Djamel SAIDI , Maitre de conférences (B) Ecole Nationale Polytechnique

ENP 2019

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique
Laboratoire de Génie Mécanique

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

Conception et réalisation d'une centrifugeuse à fond tournant

Mohammed Amokrane BOUMZOU

Sous la direction de M. Djamel SAIDI Maitre de conférences (B)

Présenté et soutenu publiquement le (06/07/2019)

Composition du Jury :

Président M .Mohamed BOUAZIZ, Professeur Ecole Nationale Polytechnique

Examineur M .Brahim GUERGUEB, Maitre-assistant (A) Ecole Nationale Polytechnique

Promoteur M. Djamel SAIDI , Maitre de conférences (B) Ecole Nationale Polytechnique



Dédicaces

Je dédie ce travail qui n'aura jamais pu voir le jour sans les soutiens indéfectibles et sans limite de mes chers parents qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui. Que dieux vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

Remerciements

Avant de commencer la présentation de ce mémoire, je profite l'occasion pour remercier du fond du cœur toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de mon projet de fin d'étude.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon encadreur Monsieur Djamel, SAIDI, enseignant à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je remercie également l'équipe de l'atelier mécanique, Monsieur Abdelkrim, LEHLAH, l'ingénieur du département et Monsieur Toufik, MEBROUK, le technicien de soudage, ainsi que les enseignants, Messieurs, Brahim, GUERGUEB, Yacine, BELKACEMI et Mohamed, LATRECHE, qui m'ont beaucoup aidé durant la phase de réalisation de mon projet.

Je remercie aussi, M.NAILI, responsable à l'entreprise SNVI, ainsi que mon ami Aissa, YALIOUA pour leurs accueils et aide pour l'usinage de précision de quelques pièces de la machine.

Comme je remercie tous les enseignants qui m'ont assisté durant tout mon parcours universitaire.

Finalement, un grand merci à ma famille, plus particulièrement mes parents, pour m'avoir soutenu et encouragé tout au long de mes études à l'Ecole Nationale Polytechnique.

« Un but ne doit pas toujours être atteint, souvent il sert juste à nous donner direction ».

Bruce, Lee

ملخص

أجهزة الطرد المركزي ذات القاعدة الدوارة، هي من معدات تشطيب الأسطح، لغرض المعالجة الميكانيكية السطحية، والتي تستخدم تكنولوجيا قوة الطرد المركزي لخلق حركة حلقيّة في محيط العمل الذي يتكون من: الوسائط الكاشطة، المواد الكيميائية المضافة والقطع المراد معالجتها. وتيرة المعالجة وإعداداتها لها تأثير كبير على الخصائص الهندسية، الميكانيكية والمعدنية للأسطح المعالجة. تتميز عملية تشطيب الأسطح بالقاعدة الدوارة، بالعديد من المزايا التقنية الاقتصادية، قصر مدة العلاج وكذلك معالجة قطع ميكانيكية ذات أشكال هندسية معقدة.

الهدف من هذا العمل المتواضع، هو تصنيع آلة الطرد المركزي ذات القاعدة الدوارة، وذلك من خلال تحديد دفتر الشروط، ثم تصميم الجهاز تحت برنامج صوليدوروكس 2016 مع تبرير الخيارات التي تم إجراؤها والتحقق من مقاومة أعضاء الجهاز عن طريق حسابات تحليلية ومحاكاة رقمية.

كلمات دلالية: تصميم، تصنيع، الطرد المركزي، تشطيب الأسطح، قوة الطرد المركزي، حسابات تحليلية، محاكاة رقمية.

Abstract

Centrifugal disks are mass finishing equipment for mechanical surface treatments, which consists in using centrifugal force technology to create a toroidal movement in the working environment which contains: the medias, the chemical additives and the pieces to be treated. The treatment regime and its parameters have a great influence on the geometrical, mechanical and metallurgical characteristics of the treated surfaces. The mass finishing process using centrifugal disks has many advantages technical and economic, a short duration of treatments, as well as the treatment of mechanical pieces with complex geometric shapes. The objective of this modest work is to make a centrifugal disk machine, by establishing a specification, then making the design of the machine under the software SOLIDWORKS 2016 while justifying the choices that have been made and verifying the resistance of the elements of the machine by analytical calculation and numerical simulation.

Keywords: Design, Realization, Centrifuge, Mass finishion, Centrifugal force, Analytical calculation, Numerical simulation.

Résumé

Les centrifugeuses à fond tournant, sont des équipements de tribofinition, destinées aux traitements mécaniques de surface, qui consistent à utiliser la technologie de la force centrifuge pour créer un mouvement toroïdal dans un environnement de travail qui contient : les médias, les additifs chimiques et les pièces à traiter. Le régime du traitement et ses paramètres ont une grande influence sur les caractéristiques géométriques, mécaniques et métallurgiques des surfaces traitées. Le procédé de tribofinition à l'aide d'une centrifugeuse à fond tournant présente de nombreux avantages technico-économiques, une courte durée des traitements ainsi que le traitement des pièces mécaniques de formes géométriques complexes.

L'objectif de ce modeste travail, est de réaliser une machine centrifugeuse à fond tournant, en établissant un cahier des charges, tout en faisant une conception de la machine sous le logiciel SOLIDWORKS 2016 avec justification des choix qui ont été faits en vérifiant la résistance des éléments de la machine par calcul analytique et simulation numérique.

Mots clés : Conception, Réalisation, Centrifugeuse, Tribofinition, Force centrifuge, Calcul analytique, Simulation numérique.

Table des matières

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre I : Notions fondamentales sur les traitements de surface

Introduction	19
I.1- Traitements chimiques	19
I.1.1- Chromatation	19
I.1.2- Phosphatation	20
I.1.3- Zingage	20
I.2- Traitements thermochimiques	21
I.2.1- Cémentation	21
I.2.2- Nitruration	22
I.2.3- Carbonitruration	23
I.3- Traitements mécaniques de surface	24
I.3.1- Grenaillage	25
I.3.2- Galetage	27
I.3.3- Martelage	29
I.3.4- Brunissage	29
I.3.1.4.1- Outils de brunissage	30
I.3.1.4.2- Principe de fonctionnement	30
I.3.5- Choc Laser	30
I.3.6- Tribofinition	31
I.3.6.1- Domaine d'application des procédés de tribofinition	32
I.3.6.2 Méthodes de tribofinition	33
I.3.6.3- Paramètres de la Tribofinition	35
Conclusion	38

TABLE DES MATIERES

Chapitre II : Frottement et usure

Introduction	40
II.1- Frottement :.....	40
II.1.1- Lois et mécanismes du frottement	40
II.1.2- Contribution adhésive au frottement	41
II.1.3- Contribution plastique au frottement	42
II.1.4- Cas de frottement	43
II.1.4.1- Frottement sec.....	43
II.1.4.2- Frottement onctueux.....	44
II.1.4.3- Frottement hydrodynamique	44
II. 1.4.4- Frottement mixte	44
II.1.5- Mesure du frottement	45
II.2- Usure.....	46
II.2.1- Mécanisme d'usure	46
II.2.2- Usure adhésive	48
II.2.3- Usure abrasive.....	49
II.2.4- Mesure de l'usure.....	50
II.3- Usure en tribofinition.....	51
II.3.1- Contact de hertz	51
II.3.2- Taux d'usure	53
II.3.3- Volume enlevé	53
Conclusion.....	54

Chapitre III : Equipements et accessoires de la tribofinition

Introduction	56
III.1- équipements de tribofinition.....	56
III.1.1- différents types de vibrateurs.....	56
III.1.1.1- Vibrateurs linéaires	56
III.1.1.2- Vibrateurs circulaires	59
III.1.2- Machines à multibroches (type Smuritropie)	61
III.1.3- Machines à force centrifuges	62
III.1.3.1- Tonneaux centrifuges.....	63
1.3.2 Centrifugeuses satellitaires.....	64
1.3.3 Centrifugeuses magnétique	66
1.3.4- Centrifugeuse à fond tournant.....	67

TABLE DES MATIERES

III.2- Médias	69
III.2.1- Types des médias.....	69
III.2.2- Formes des médias.....	72
III.2.3- Sélection des médias.....	73
III.3- Additifs chimiques	74
III.3.1- Additifs liquides	75
III.3.2- Additifs en poudre	76
III.3.2- Additifs en pâte.....	77
Conclusion	77

Chapitre IV : Conception de la centrifugeuse à fond tournant

Introduction	80
IV.1- Définition du cahier des charges.....	80
IV.1.1- Analyse du besoin	80
IV.1.2- Liste des contraintes	81
IV.2- Conception des éléments de la centrifugeuse.....	82
IV.2.1- Chambre de travail	82
IV.2.2- Structure de la machine	82
IV.2.2.1- Structure principale.....	83
IV.2.2.2- Base de la structure.....	84
IV.2.2.3- Couverture de la structure.....	84
IV.2.3- Fixation de la chambre du travail	85
IV.2.3.1- Ceintures de fixation.....	85
IV.2.3.2- Supports	86
IV.2.3.3- Brides.....	86
IV.2.3.4- Axes	87
IV.2.3.5- Assemblage du système	87
IV.2.4- Fixation du moteur	91
IV.2.4.1- Support du moteur	91
IV.2.4.2- Disque rotatif	92
IV.2.5- La partie électrique	94
IV.2.5.1- Moteur.....	94
IV.2.5.2- Variateur de vitesse.....	95
IV.3- Calcul, dimensionnement, simulation et ajustement.....	95
IV.3.1- Simulation de la structure.....	95

TABLE DES MATIERES

IV.3.2- Résistance du système de fixation.....	96
IV.3.2.1- calcul de la résistance des vis	96
IV.3.2.2- simulation des équerres.....	98
IV.3.2- Calcul des ajustements	99
IV.4- Schéma cinématique de la machine	100
IV.4.1- Graphe de liaison.....	100
IV.4.2- Schéma cinématique de la centrifugeuse.....	101
Conclusion.....	101
<u>Chapitre V : Réalisation de la centrifugeuse à fond tournant</u>	
Introduction	103
IV.1- Fabrication de la structure.....	103
IV.1.1- Gammes de fabrication et d'assemblage de la structure	103
IV.1.2- Réalisation de la structure	105
IV.2- Fixation de la chambre de travail.....	107
IV.2.1- Gammes de fabrication et d'usinage	107
IV.2.2- Réalisation.....	110
IV.3- Fixation du moteur.....	114
IV.3.1- Gammes de fabrication et d'usinage	114
IV.3.2- Réalisation.....	116
IV.4- Vue globale de la machine	118
Conclusion.....	121
Conclusion générale	122
Références bibliographiques	123
Annexes	126

Liste des figures

Chapitre I

Figure 1-Chromatation sur aluminium	20
Figure 2-Phosphatation	20
Figure 3- Taille des cuves pour le zingage	21
Figure 4-Une pièce trempée pour passer à la cémentation	22
Figure 5-Four vertical de nitruration	23
Figure 6-Exemple d'une buse de grenailleuse à air comprimé	26
Figure 7-Fonctionnement d'une grenailleuse à turbine	26
Figure 8-Schéma de principe du procédé de galetage	27
Figure 9-Principe de fonctionnement du galetage	28
Figure 10-Outil du galetage commercialisé par la firme COGSDILL TOOL : a) partie active, b) corps de l'outil	28
Figure 11-Différentes surfaces à traiter par galetage	28
Figure 12-Principe du fonctionnement du martelage	29
Figure 13-Schéma de la déformation des irrégularités de surface lors d'un traitement par bille	29
Figure 14- Outils de brunissage (Brunissoir)	30
Figure 15-Schéma du dispositif classique de traitement de choc laser	31
Figure 16-Traitement par tribofinition	32
Figure 17-Opérations réalisées par tribofinition	32
Figure 18-Traitements de tribofinition par vibrations	34
Figure 19- Traitements de tribofinition par Smuritropie	34
Figure 20- Traitements de tribofinition par force centrifuge	35
Figure 21- Force centrifuge	35

Chapitre II

Figure 22- Contact entre deux solides en présence de frottement	40
Figure 23- Aire de contact entre deux solides	41
Figure 24- Frottement résultant de la déformation plastique d'un matériau	42
Figure 25- Sphère rigide frottant sur un matériau déformable	42
Figure 26- Cas du frottement sec.....	43
Figure 27- Cas du frottement onctueux.....	44
Figure 28- Cas du frottement hydrodynamique	44
Figure 29- Tribomètre de type pion-disque	45
Figure 30- Exemples de surfaces usées par différents mécanismes	46
Figure 31- frottement d'un pion sur un matériau de base.....	47
Figure 32- frottement d'un pion sur un matériau de base.....	47
Figure 33- Mécanisme de l'usure adhésive	48
Figure 34- Exemple de grippage, manifestation sévère de l'usure adhésive	49
Figure 35- Les quatre modes d'usure abrasive	50
Figure 36- Exemples de piste d'usure a) Piste en acier après frottement avec un pion en acier b) Piste d'une garniture mécanique après frottement	50
Figure 37- Mesure du volume d'usure.....	51
Figure 38- Déformation locale	51

<i>Figure 39- Modélisation des déformations</i>	52
<i>Figure 40- Zone de contact</i>	52
<i>Figure 41- Répartition de pression (ellipsoïde)</i>	53

Chapitre III

<i>Figure 42- Vibrateur linéaire</i>	56
<i>Figure 43- Principe de fonctionnement d'un vibrateur linéaire</i>	57
<i>Figure 44- Vibrateur linéaire</i>	58
<i>Figure 45- Vibrateur linéaire de type TE</i>	58
<i>Figure 46- Vibrateur linéaire de type TS</i>	59
<i>Figure 47- Schéma descriptif d'un vibrateur circulaire</i>	59
<i>Figure 48- Principe de fonctionnement d'un vibrateur linéaire</i>	60
<i>Figure 49- Vibrateur circulaire</i>	61
<i>Figure 50- Vibrateur circulaire à grand rayon</i>	61
<i>Figure 51- Machines à broches</i>	62
<i>Figure 52- fonctionnement d'une machines à broche</i>	62
<i>Figure 53- Tonneau centrifuge</i>	63
<i>Figure 54- Fonctionnement d'un tonneau centrifuge</i>	63
<i>Figure 55- Coupe transversale du tonneau montrant le flux des pièces et des médias</i>	64
<i>Figure 56- centrifugeuse satellitaire</i>	65
<i>Figure 57- Fonctionnement d'une centrifugeuse satellitaire</i>	65
<i>Figure 58- centrifugeuse satellitaire à axe oblique</i>	66
<i>Figure 59- Centrifugeuse magnétique</i>	67
<i>Figure 60- centrifugeuse à fond tournant</i>	67
<i>Figure 61- Principe de la machine centrifugeuse à fond tournant</i>	68
<i>Figure 62- Centrifugeuse à fond tournant lors du traitement</i>	69
<i>Figure 63- Médias naturels</i>	70
<i>Figure 64- Médias en céramique</i>	70
<i>Figure 65- Médias en plastique</i>	71
<i>Figure 66- Médias en porcelaine</i>	71
<i>Figure 67- Médias métalliques</i>	72
<i>Figure 68- Formes des médias utilisés pour tribofinition</i>	73
<i>Figure 69- Exemples de médias adaptés aux caractéristiques de la pièce</i>	74
<i>Figure 70- Additifs liquides</i>	75
<i>Figure 71- Additifs en poudre</i>	76
<i>Figure 72- Additifs en pâte</i>	77

Chapitre IV

<i>Figure 73- Chambre de travail</i>	82
<i>Figure 74- Vue en coupe de la cornière utilisée pour la structure de la machine</i>	83
<i>Figure 75- Forme de la structure</i>	83
<i>Figure 76- Base de la structure</i>	84
<i>Figure 77- Couverture de la structure</i>	84
<i>Figure 78- Fixation de la chambre de travail</i>	85
<i>Figure 79- Ceinture de fixation</i>	86

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 80- Support</i>	86
<i>Figure 81- Bride</i>	87
<i>Figure 82- Axe</i>	87
<i>Figure 83- Assemblage axe-bride</i>	88
<i>Figure 84- Palier utilisé</i>	88
<i>Figure 85- Dimensions du palier</i>	88
<i>Figure 86- Assemblage axe-palier</i>	89
<i>Figure 87- Bride-support</i>	89
<i>Figure 88- fixation des supports sur les ceintures de la chambre de travail</i>	90
<i>Figure 89- Levier de la machine</i>	90
<i>Figure 90- Equerre de fixation du levier</i>	90
<i>Figure 91- Plaque de fixation du moteur</i>	91
<i>Figure 92- Assemblage plaque et équerres</i>	91
<i>Figure 93- Vue en coupe du montage des équerres avec le support</i>	92
<i>Figure 94- Vue en coupe du montage des équerres avec la ceinture</i>	92
<i>Figure 95- Transmission du mouvement du moteur vers le disque rotatif</i>	93
<i>Figure 96- Bride de transmission</i>	93
<i>Figure 97- Disque rotatif</i>	94
<i>Figure 98- Moteur électrique</i>	94
<i>Figure 99- Variateur de vitesse</i>	95
<i>Figure 100- Etapes de simulation de la structure</i>	95
<i>Figure 101- Résultats de la simulation de la structure</i>	96
<i>Figure 102- Vis des brides</i>	96
<i>Figure 103- Vis du moteur</i>	97
<i>Figure 104- Etapes de la simulation</i>	98
<i>Figure 105- Résultats de la simulation</i>	99
<i>Figure 106- Graphe de liaison de la centrifugeuse</i>	100
<i>Figure 107- Schéma cinématique de la centrifugeuse</i>	101

Chapitre V

<i>Figure 108- Traçage découpage et soudage le la structure</i>	106
<i>Figure 109- Couverture de la structure</i>	106
<i>Figure 110- Finition de la structure</i>	106
<i>Figure 111- Ceintures</i>	110
<i>Figure 112- Supports</i>	111
<i>Figure 113- Levier et équerre</i>	111
<i>Figure 114- Réalisation des axes</i>	111
<i>Figure 115- Réalisation des brides</i>	112
<i>Figure 116- Assemblage d'axes-brides-paliers</i>	112
<i>Figure 117- Montage de la chambre de travail</i>	113
<i>Figure 118- Finition de la chambre de travail</i>	113
<i>Figure 119- Equerres du moteur</i>	116
<i>Figure 120- Plaque du moteur</i>	117
<i>Figure 121- Bride de transmission</i>	117
<i>Figure 122- Disque rotatif</i>	117
<i>Figure 123- Montage de la bride de transmission</i>	118

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 124- Assemblage-moteur.....</i>	<i>118</i>
<i>Figure 125- Fond de la chambre de travail.....</i>	<i>119</i>
<i>Figure 126- Vue finale de la chambre de travail.....</i>	<i>119</i>
<i>Figure 127- la chambre de travail après montage</i>	<i>120</i>
<i>Figure 128- Vue finale de la centrifugeuse à fond tournant.....</i>	<i>120</i>

Liste des tableaux

Chapitre II

<i>Tableau 1- Paramètres utilisés pour l'évaluation du coefficient de frottement adhésif</i>	42
<i>Tableau 2- Valeurs indicatives de coefficients de frottement statique et dynamique de matériaux usuels en frottement à sec</i>	45
<i>Tableau 3- Valeurs indicatives de coefficients de coefficient d'usure K de matériaux usuels en frottement à sec</i>	51

Chapitre III

<i>Tableau 4-Utilité des formes des médias utilisés en tribofinition</i>	73
<i>Tableau 5- Les différents additifs chimiques liquides</i>	76
<i>Tableau 6- Les différents additifs chimiques en poudre</i>	77

Chapitre IV

<i>Tableau 7- Solutions techniques et constructives</i>	81
<i>Tableau 8- Liste des contraintes de chaque élément</i>	82
<i>Tableau 9- Caractéristiques de tube en PVC</i>	82
<i>Tableau 10- Caractéristiques de la cornière utilisée</i>	83
<i>Tableau 11- Caractéristiques de la base de la structure</i>	84
<i>Tableau 12- Caractéristiques de la tôle utilisé</i>	85
<i>Tableau 13- Caractéristiques des ceintures</i>	85
<i>Tableau 14- Caractéristiques des supports</i>	86
<i>Tableau 15- Caractéristiques des brides</i>	86
<i>Tableau 16- Caractéristiques des axes</i>	87
<i>Tableau 17- Caractéristiques du palier</i>	89
<i>Tableau 18- Caractéristiques des vis</i>	89
<i>Tableau 19- Caractéristiques de l'équerre</i>	91
<i>Tableau 20- Caractéristiques de la plaque</i>	91
<i>Tableau 21- Caractéristiques du moteur</i>	94
<i>Tableau 22- Caractéristiques du variateur de vitesse</i>	95

Chapitre V

<i>Tableau 23- Gamme de fabrication des éléments de la structure</i>	103
<i>Tableau 24- Gamme de fabrication de la tôle pour couverture de la structure</i>	104
<i>Tableau 25- Gamme de fabrication de la base de la structure</i>	104
<i>Tableau 26- Gamme d'assemblage de la structure</i>	105
<i>Tableau 27- Gamme de fabrication des ceintures</i>	107
<i>Tableau 28- Gamme de fabrication des supports</i>	108
<i>Tableau 29- Gamme de fabrication de l'équerre du levier</i>	108
<i>Tableau 30- Gamme d'usinage des axes</i>	109
<i>Tableau 31- Gamme d'usinage des brides</i>	109
<i>Tableau 32- Gamme d'assemblage des axes</i>	110

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 33- Gamme de fabrication des équerres</i>	<i>114</i>
<i>Tableau 34- Gamme de fabrication de la plaque du moteur</i>	<i>115</i>
<i>Tableau 35- Gamme d'usinage de la bague de transmission</i>	<i>115</i>
<i>Tableau 36- Gamme d'usinage du disque rotatif.....</i>	<i>116</i>

Introduction générale

Actuellement, le développement dans le domaine du traitement mécanique de surface est caractérisé par les créations de nouveaux procédés, car toutes les pièces qui doivent remplir une fonction requise doivent avoir un meilleur état de surface soit une faible rugosité et aussi une dureté élevée.

L'objectif de ce modeste travail est de réaliser une centrifugeuse à fond tournant destinée aux traitements mécaniques de surface par le procédé de tribofinition.

La tribofinition est un procédé mécano-chimique qui consiste à enlever les petites particules sur les surfaces par des outils non guidés (médiats et additifs chimiques), afin d'améliorer les caractéristiques géométriques, mécaniques et métallurgiques, à savoir, l'état de surface, la dureté et la micro-dureté de la couche superficielle, tout en faisant des opérations de polissage, rayonnage, ébavurage, décalaminage, lissage, désoxydation, décapage, dégraissage, grenailage, le brillantage, etc.... Ce procédé permet de traiter des différents matériaux, bois, verre, composites, acier, aluminium, et autres. Le domaine d'application convient particulièrement aux industries diverses, aéronautiques, navale, automobile, nucléaire, médicale, agro-alimentaire, etc.

La centrifugeuse à fond tournant conçue et réalisée se compose de plusieurs éléments, un moteur électrique qui transmet une rotation vers un disque rotatif via une bride de transmission, ces derniers sont fixés dans la chambre de travail qui elle-même repose sur une structure grâce à un système d'axe-palier qui permet de la vider après chaque utilisation.

Ce mémoire est subdivisé en 5 chapitres :

Le premier chapitre aborde les procédés de traitements de surface d'une façon générale, traitements chimiques, thermo-chimiques et en particulier les traitements mécaniques de surface à titre d'exemple, le grenailage, le galetage, le martelage, le brunissage, le choc laser et enfin la tribofinition. Parmi les traitements de tribofinition, on trouve le traitement par vibration, par Smuritropie et par la force centrifuge qui est la technique utilisée par la machine conçue et réalisée.

Le second chapitre comporte des généralités sur les frottements, l'usure et définit la méthode et le matériel de mesure ainsi que leurs applications en tribofinition pour le cas des centrifugeuses à fond tournant.

Le troisième chapitre traite les différents équipements et accessoires utilisés en tribofinition. Parmi ces équipements on trouve les vibrateurs linéaires, circulaires, machine de Smuritropie et centrifugeuses (tonneaux centrifuges, centrifugeuses satellitaires, centrifugeuses magnétiques et centrifugeuses à fond tournant).

Dans le domaine de la tribofinition, il existe une large gamme de médias, leur choix dépend de plusieurs facteurs à savoir leur formes, tailles et matériaux afin d'obtenir un résultat performant. Il existe plus de 6500 types de médias.

En ce qui concerne les additifs chimiques, ils peuvent être sous trois états, liquides, poudres ou pâtes et ils sont choisis en fonction de :

- L'application (ébavurage, polissage, brillantage, effet mat, dégraissage, passivation...)

INTRODUCTION GENERALE

- La matière constituant les pièces à traiter
- Les normes environnementales à respecter
- Etc...

Le quatrième chapitre porte sur la conception de la centrifugeuse sous le logiciel SOLIDWORKS 2016, tout en définissant un cahier des charges, en présentant les éléments essentiels de la machines. On introduit aussi dans ce chapitre des calculs analytiques et simulations numériques ainsi que le graphe des liaisons et le schéma cinématique de la machine.

Le dernier chapitre est dédié à la réalisation de la centrifugeuse à fond tournant après avoir exécuté la gamme de fabrication, d'usinage et d'assemblage des éléments essentiels de la machine.

La conclusion générale fait une synthèse des travaux réalisés.

Chapitre I

Notions fondamentales sur les Traitements de surface

Introduction

Le traitement de surface est une opération mécanique, chimique, mécano-chimique ou thermo-chimique qui a pour conséquence de modifier l'aspect ou la fonction de la surface des matériaux, dans le but d'améliorer leurs propriétés géométriques, mécaniques et métallurgiques en l'occurrence l'état de surface (rugosité), la résistance à la traction statique et dynamique, la dureté, la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et de l'adapter à des conditions d'utilisation bien spécifique. Les traitements de surface jouent un rôle éminent dans le domaine de la tribologie et tribofinition.

La forte importance du domaine de traitement de surface le rend un domaine très vaste, qui peut se divisés en trois grandes catégories : Les traitements chimiques (Chromatation, Phosphatation, Zingage...), les traitements thermo-chimiques (Cémentation, Nitruration, Carbonitruration ...) et les traitements mécaniques (Grenaillage, Galetage, Martelage, Brunissage, Choc Laser et la tribofinition qui fera le cœur de notre sujet)

Dans ce chapitre nous avons consacré notre étude sur les différents procédés utilisés dans le domaine de traitement de surface et leur domaine d'application.

I.1- Traitements chimiques

Les traitements chimiques permettent la formation, par simple immersion, de couches superficielles de précipités, tels que des chromates, ou des phosphates, assurant ainsi une protection contre la corrosion ou favorisant l'adhésion de vernis ou de peinture appliqués ultérieurement. Les réactions de formation des couches de conversion reposent d'une part sur une oxydation du substrat métallique sur des microsites anodiques et d'autre part sur la réduction du solvant (H_2O , H^+), la réduction entraîne une élévation locale de pH et au final l'obtention d'un précipité en surface du substrat. [13]

I.1.1- Chromatation

La chromatation est un traitement chimique pouvant être appliqué par aspersion ou par immersion à partir de solutions contenant du chrome hexavalent¹, pour former des couches d'oxydes complexes. Les conversions avec fluorures de potassium (KF) et éventuellement du ferricyanure de potassium $K_3[Fe(CN)_6]$ induisent une coloration iridescente à jaune de la couche.

La durée de traitement varie de 1 à 3 minutes et la température maximale d'utilisation est de 70°C (pour éviter une fissuration importante de la couche). Les couches obtenues sont de faible épaisseur d'environ 0,5 μm , soit une masse surfacique de l'ordre de 1 g/m^2 . La couche de chromatation est une excellente base d'accrochage pour les finitions organiques. Elle augmente légèrement la résistance à la corrosion. [27]

¹ Le **chrome hexavalent** ou chrome(VI) est le 6^e état d'oxydation du chrome. C'est un produit extrêmement toxique.



Figure 1-Chromatisation sur aluminium [28]

I.1.2- Phosphatation

C'est un traitement de conversion chimique dénommé phosphatation Manganèse ou Fer-Manganèse. Ce traitement est réalisé par immersion dans un bain acide contenant des ions phosphates et des ions Manganèse. Il y a dissolution partielle de l'acier et précipitation d'une couche de phosphates mixtes de Fer et Manganèse $[(Mn,Fe)_5 H_2(PO_4)_4, 4H_2O]$.

La phosphatation Manganèse doit être suivie d'une lubrification pour éviter la corrosion de l'acier sous-jacent. On parle de "Phosphatation Manganèse grasse" ou de "Phosphatation Manganèse finition grasse". En effet, la structure cristallographique du dépôt (type rose des sables) permet une bonne rétention des huiles et graisses. [29]



Figure 2-Phosphatation [30]

I.1.3- Zingage

Le processus de zingage est exécuté à l'intérieur de cuves contenant une solution alcaline de soude à 120g/l, du zinc dissous à environ 8g/l et des additifs commerciaux, par réduction électrochimique provoquée par la polarisation cathodique du matériau à protéger en contact électrique avec un redresseur de courant continu ; la partie de la cellule électrochimique est représentée par des tôles d'acier au carbone placées latéralement par rapport au matériau devant être traité.

CHAPITRE I : Notions fondamentales sur les traitements de surface

Le zingage électrolytique est réalisé au moyen de courant électrique en tant que source d'énergie de la réaction de réduction d'ions de zinc (dissous dans la solution électrolytique) sur le matériau à protéger.

Afin de compenser la consommation de métal dissous (zinc) dans les cuves d'électrodéposition, la solution électrolytique est constamment renouvelée au moyen de pompes reliées à la cuve poumon (auxiliaire), le retour du liquide dans cette dernière étant effectué par chute à travers des tuyaux.

En ce qui concerne la consommation des additifs, celle-ci est réglée par des pompes doseuses avec des additions dans la cuve poumon de manière proportionnelle à la quantité de courant électrique utilisé dans le bain considéré. [29]

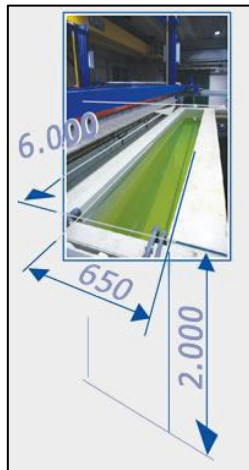


Figure 3- Taille des cuves pour le zingage [29]

I.2- Traitements thermochimiques

Un traitement thermochimique est un traitement thermique effectué dans un milieu convenablement choisi pour obtenir une modification de la composition chimique du métal de base, par échange avec ce milieu. Dans le cas de ces traitements, les éléments mis en jeu pour enrichir la couche superficielle du métal sont apportés par des milieux qui peuvent être solides (ciments), liquides (bain de sels) ou gazeux.

Il existe de nombreux types de traitements thermochimiques ayant pour but d'améliorer la résistance des pièces à la fatigue, à l'usure, au frottement, au grippage, à la corrosion...etc. [26]

Parmi les traitements thermochimique on site :

I.2.1- Cémentation

La cémentation est le procédé le plus ancien de la saturation de la surface de l'acier par le carbone. Elle est utilisée afin d'obtenir une dureté et une résistance à l'usure élevées des couches superficielles tout en conservant un cœur doux et tenace. L'opération est réalisée dans un milieu susceptible de céder du carbone à l'acier porté à une température supérieure à AC_3 , le plus souvent entre 850 °C et 1000 °C. Le durcissement est accompli lorsque la couche

CHAPITRE I : Notions fondamentales sur les traitements de surface

enrichie en carbone est trempée pour former de la martensite² conduisant à une bonne résistance à l'usure et à la fatigue.

La trempe est réalisée soit directement après cémentation (trempe directe) soit après refroidissement du métal et réchauffage ultérieur. La couche cémentée atteint le maximum de dureté (environ 800 à 900 HV) après la trempe martensitique pour des tenures en carbone voisines de l'eutectoïde³. Un éventuel revenu de détente (entre 180°C et 200 °C) après trempe ramènerait la dureté aux environs de 600 HV à 760 HV.

La profondeur de cémentation est fonction du temps, de la température et du potentiel de carbone en surface. La profondeur de cémentation est plus grande après un long temps de maintien et un potentiel élevé de carbone produit une quantité élevée de carbone en surface. Le choix de l'atmosphère a également une grande influence sur le processus de cémentation. Les différentes atmosphères employées dans l'industrie de cémentation impliquent la dissociation des composants de l'atmosphère en surface de l'acier ; ainsi le carbone libéré est aisément dissous par la phase d'austénite et peut diffuser dans la pièce. En outre, certains éléments d'alliage peuvent agir d'une manière sensible sur la vitesse de diffusion du carbone au cours de la cémentation.

Qui consiste à faire pénétrer superficiellement du carbone dans un acier dont le pourcentage de carbone est insuffisant pour prendre de la trempe, afin de le transformer en surface en un acier fortement carburé susceptible d'être trempé. [23]

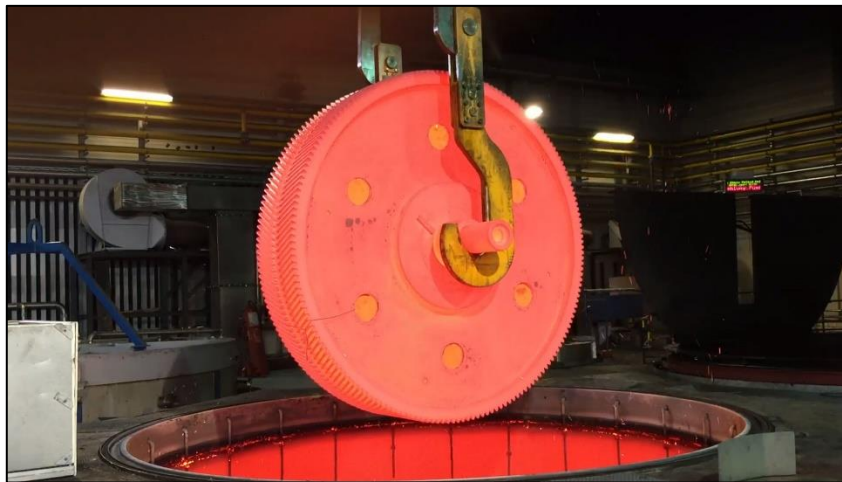


Figure 4- Une pièce trempée pour passer à la cémentation [31]

I.2.2- Nitruration

La nitruration est un procédé thermo-chimique au cours duquel l'azote diffuse de la surface vers le cœur de la pièce. Dans le cas des aciers, on réalise préalablement un traitement thermique de trempe et de revenu pour conférer à la pièce une bonne résistance mécanique à cœur.

La nitruration est réalisée pour des températures allant de 450 °C (début de la dissociation de l'Ammoniac) à 590 °C (pour ne pas modifier la microstructure de l'acier) et

² La **martensite** (fer α') est une phase métastable des aciers.

³ Une transformation **eutectoïde** est une transformation de phase solide en phase solide qui se déroule à température constante.

pour des durées pouvant aller jusqu'à une centaine d'heures, ce qui permet d'obtenir des couches de l'ordre du millimètre.

Le procédé de nitruration, au contraire de la cémentation, se termine par un refroidissement lent pour éviter tout choc thermique responsable des fissurations ainsi que des fortes distorsions. Le traitement de nitruration permet d'augmenter de façon considérable les propriétés superficielles. En effet, l'enrichissement des couches superficielles en azote a pour conséquence directe l'augmentation de la dureté des couches concernées. Cette augmentation de dureté permet d'augmenter la résistance à l'usure, à la fatigue, à la fissure et à la corrosion.

Le procédé de nitruration est très utilisé car les variations dimensionnelles sont très faibles après traitement ce qui permet d'effectuer celui-ci sur des pièces finies.

Les propriétés mécaniques des pièces après nitruration sont stables thermiquement. Cependant dans le cas de pièces fortement sollicitées en contact, il est nécessaire d'enlever la couche de combinaison pour réduire le risque d'écaillage et de fissuration. [14]

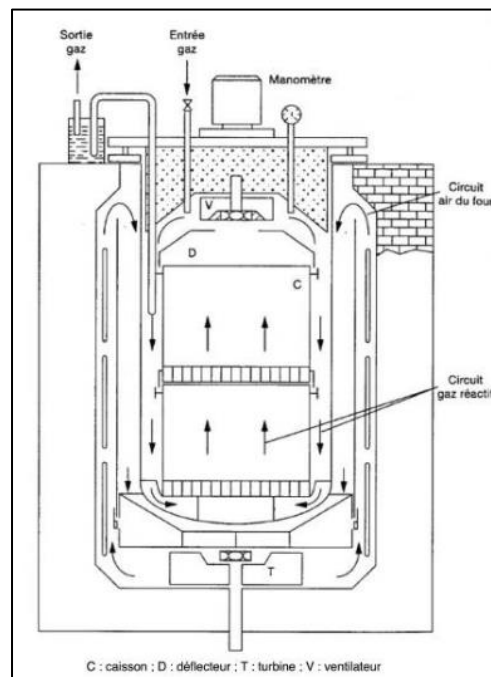


Figure 5-Four vertical de nitruration [14]

I.2.3- Carbonitruration

La carbonitruration est un traitement thermochimique auquel est soumis un produit ferreux porté à l'état austénitique⁴ pour obtenir un enrichissement superficiel en carbone et azote, éléments qui se trouvent alors en solution dans l'austénite. Comme en cémentation, le durcissement est obtenu par trempe dans le but de générer des microstructures hors équilibre (de type martensite)

L'élément de diffusion principal reste le carbone, bien que de l'azote soit également apporté dans la couche traitée. En effet, ce dernier présent en solution solide n'est pas utilisé comme le carbone pour obtenir une solution sursaturée du type martensitique après trempe. Il

⁴ L'austénite est une solution solide de carbone dans l'allotrope γ du fer

apporte toutefois des effets importants qui justifient les différences essentielles entre la cémentation et la carbonituration :

- Amélioration de la diffusion du carbone
- Accroissement du domaine de solubilité du carbone dans l'austénite par abaissement des points de transformation $Fe\ \alpha \rightarrow Fe\ \gamma$.
- Action synergique de l'azote et du carbone en augmentant considérablement la trempabilité de la couche par abaissement du point de transformation M_s . Cependant, une couche carbonitrurée contiendra plus d'austénite résiduelle qu'une couche cémentée de même teneur en carbone

Ainsi, il est admis que la carbonituration est un traitement thermochimique de cémentation activé par l'azote. Des trois effets précédemment décrits découlent des avantages de la carbonituration par rapport à la cémentation avec notamment :

- Un raccourcissement du temps de traitement comparé à celui nécessaire en cémentation classique pour obtenir la même épaisseur de couche. Ceci s'explique par l'augmentation du coefficient de diffusion du carbone dans l'acier quand il est associé à l'azote.
- Une diminution de la température de traitement. L'azote diminuant la température de transformation allotropique du fer, on peut ainsi obtenir du fer γ à 590 °C en augmentant la teneur en azote.
- Une amélioration de la trempabilité de la couche enrichie. Dans le cas des aciers non alliés, cela permet d'atteindre un meilleur durcissement pour un refroidissement donné. Pour les aciers alliés, la vitesse de refroidissement peut être réduite tout en conservant un durcissement identique.

Ces différentes caractéristiques induisent des intérêts technico-économiques évidents avec :

- La réduction des coûts grâce à la diminution des temps de traitement, à l'abaissement des températures et à la possibilité d'utiliser des nuances d'aciers non alliés.
- Un meilleur contrôle des déformations géométriques grâce à l'application de conditions de traitement moins brutales pendant les phases de chauffage et de refroidissement.
- Une meilleure maîtrise de la taille des grains du fait de la température d'austénitisation limitée. [12]

I.3- Traitements mécaniques de surface

Les traitements mécaniques de surface sont des procédés qui permettent d'améliorer les caractéristiques des matériaux à savoir les propriétés physiques, mécaniques, métallurgiques et géométriques et autres. Dans le domaine du traitement mécanique de surface, il existe plusieurs procédés à titre d'exemple : Le grenailage, le galetage, le martelage, le brunissage, le choc laser et enfin la tribofinition. Chaque procédé est utilisé dans un domaine d'application bien spécifique.

Dans notre travail, on s'intéresse au procédé de tribofinition qui est une méthode de traitement mécano-chimique qui consiste à enlever les petites particules du métal et ses oxydes par des outils non guidés appelés (medias), tout en rajoutant des additifs chimiques

pour compléter le traitement, la particularité de ce procédé par rapport aux autres, consiste dans le traitement des pièces de configuration géométriques très complexe.

I.3.1- Grenailage [10]

Le grenailage de précontrainte (également appelé Shot Peening) est un traitement mécanique de surface dans le but de générer des contraintes résiduelles de compression, permettant d'améliorer la durée de vie d'une pièce.

Il consiste à marteler la surface d'une pièce de grenailles (petites billes sphériques, en acier, céramique ou en verre), projetées à grande vitesse sous des conditions contrôlées. Les impacts déforment plastiquement la couche superficielle. La déformation en sous couche reste élastique. L'équilibrage global de la structure introduit des contraintes résiduelles de compression sur quelques dixièmes de millimètre. Le recouvrement total de la surface par un réseau d'empreintes suffisamment denses marque la fin de l'opération. Un profil uniforme de contraintes résiduelles est alors obtenu.

De par son intérêt économique manifeste, comparé aux autres types de traitements, le grenailage demeure aujourd'hui le procédé le plus utilisé dans les industries.

Différents types de Grenailleuses

Deux types principaux de grenailleuses sont utilisés dans l'industrie : les machines à air comprimé et les machines à turbine.

a. Grenailleuses à air comprimé

Les billes sont propulsées par de l'air comprimé au travers d'une buse (figure 6). Cette machine présente l'intérêt d'être maniable et automatisable. Les paramètres sont bien maîtrisés. Elle propose un jet de billes relativement directionnel. Ce procédé est ainsi utilisé pour des pièces à géométrie complexe ou pour des zones peu accessibles (surfaces intérieures). Les pièces sont traitées de manière unitaire. On peut également intégrer plusieurs buses d'orientations différentes pour traiter une pièce de forme complexe. Toutefois, cette machine nécessite un investissement et une maintenance lourds. Elle présente par ailleurs une capacité de production faible.



Figure 6-Exemple d'une buse de grenailleuse à air comprimé [10]

b. Grenailleuses à turbine

Dans ces machines, les billes sont introduites au centre de la turbine, qui tourne à une vitesse de rotation bien définie. Sous l'effet de la force centrifuge, les billes sont entraînées et accélérées vers l'extérieur de la turbine pour enfin être projetées en gerbe sur la pièce. Comme on peut le voir sur la Figure 7, la zone grenillée est beaucoup plus importante qu'avec le procédé précédent. Les paramètres sont moins maîtrisables, et plus particulièrement l'angle d'incidence (qui sera, du coup, compris dans une fourchette de valeurs). Ce procédé est plutôt destiné à des pièces de géométrie plus simple, ou à des pièces plus massives. Il est adéquat pour les chaînes de production où l'on traitera des quantités importantes de pièces similaires. Il en est de même pour des structures longues défilant en continu dans des machines en tunnel prévues à cet effet.

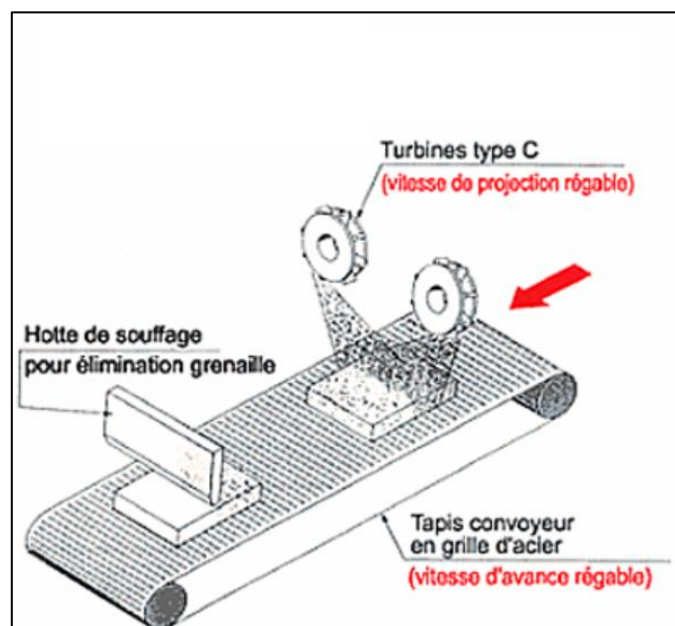


Figure 7-Fonctionnement d'une grenailleuse à turbine [32]

I.3.2- Galetage

Le galetage est un procédé de finition qui a pour but de produire une déformation localisée en surface d'une pièce métallique. Il est répertorié dans la gamme des traitements mécaniques de surface. Il peut être mis en œuvre dans la configuration pièce tournante – outil fixe comme dans la configuration pièce fixe – outil tournant. La cinématique du procédé le rend cependant plus adapté à la mise en forme de pièces axisymétriques sur tour. Dans ce cas, il est possible de traiter aussi bien des arbres que des alésages.

En fonction de la finalité recherchée, on distingue 3 types d'opérations de galetage :

- 1- le galetage de précision en état de surface, par fois appelé brunissage ou lissage, utilisé à des fins d'amélioration d'état de surface
- 2- le galetage de précision dimensionnelle utilisé à des fins de calibrage géométrique
- 3- le galetage de renforcement utilisé à des fins d'améliorations des caractéristiques mécaniques de la pièce.

Bien que distingués par différents objectifs, ces procédés obéissent au même principe : un ou plusieurs éléments roulants sont pressés sur la surface de la pièce. L'effort appliqué génère une contrainte de contact dans le matériau. Celui-ci accommode cette sollicitation par une déformation. Lorsque la contrainte générée dépasse la limite élastique, le matériau se trouve déformé à la fois élastiquement et plastiquement. [15]

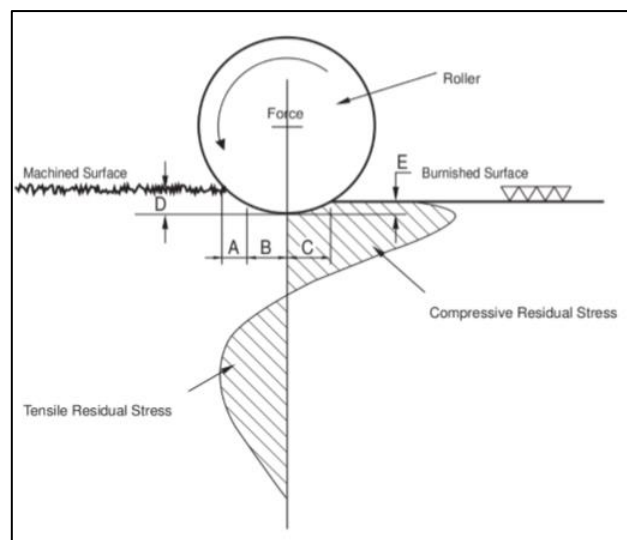


Figure 8-Schéma de principe du procédé de galetage [15]

Parmi les traitements mécaniques de surface (TMS) qui consistent à bonifier les propriétés des matériaux, le galetage est l'un des procédés qui trouve des applications de plus en plus larges dans le domaine industriel.

Le galetage constitue un traitement de mise en œuvre à froid, il déforme plastiquement les couches superficielles d'une pièce ayant subi en général un usinage préalable par enlèvement de copeaux. [22] (voir figure 9)

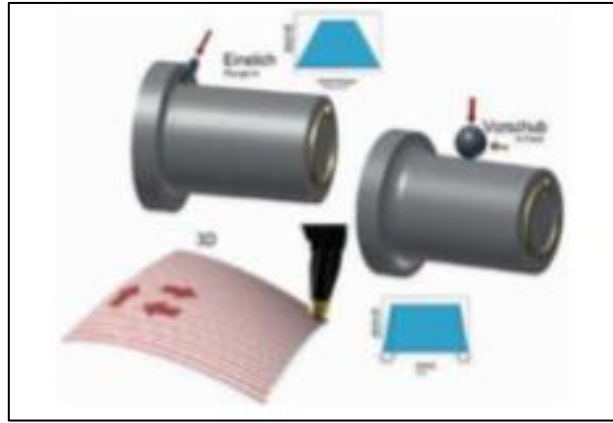


Figure 9-Principe de fonctionnement du galetage [19]

La technologie du procédé est variée selon la machine et l'outil utilisé. Elle réside principalement dans le fait que la force appliquée par l'outil de galetage sur la pièce à traiter oblige les couches superficielles de celles-ci à subir une déformation plastique.

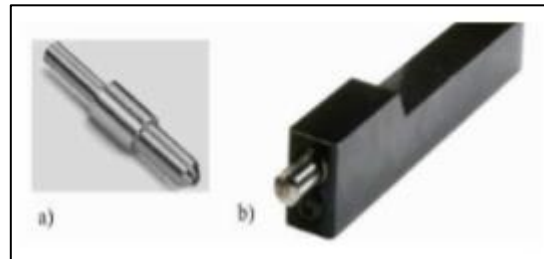


Figure 10-Outil de galetage commercialisé par la firme COGSDILL TOOL : a) partie active, b) corps de l'outil [19]

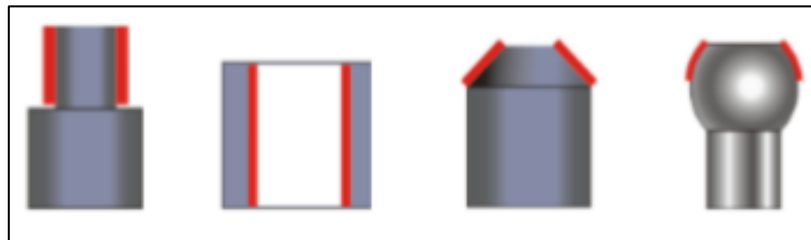


Figure 11-Différentes surfaces à traiter par galetage [22]

Avantages du galetage

Amélioration de l'état de surface de la pièce usinée. Opération économique du fait qu'elle se fait sur pièce non traitée, et donc qu'elle économise une opération de rectification plus coûteuse. Opération très précise, surtout dans le cas de l'utilisation de la commande numérique.

I.3.3- Martelage

Le martelage conventionnel est une technique datant des années 1940 qui est effectué à l'aide d'un outil pneumatique, hydraulique ou électrique dont l'extrémité arrondie vient marteler la surface de la pièce à traiter. Les impacts répétés à une fréquence généralement comprise entre 20 et 100 Hz induisent la création d'un sillon qui peut être plus ou moins prononcé suivant le nombre de passes. [11]

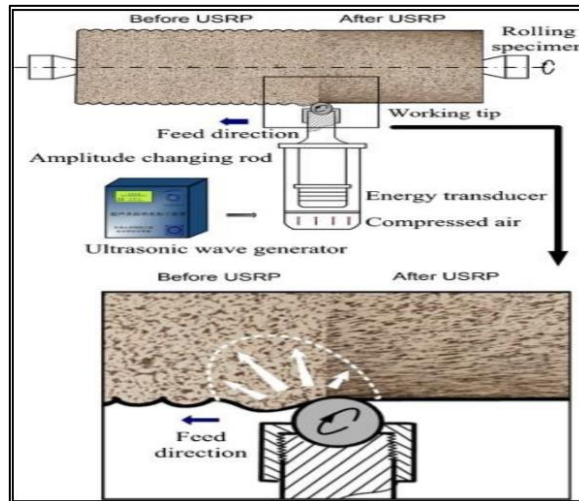


Figure 12-Principe du fonctionnement du martelage [18]

Les contraintes résiduelles émanant de ces déformations plastiques locales atteignent généralement entre 2 et 5 mm de profondeur. Les modifications apportées par cette technique en font l'une des plus efficaces pour le post-traitement des joints soudés. Cependant, ce procédé reste fastidieux et bruyant. De plus, la surface relativement lisse obtenue peut parfois dissimuler des défauts de type repli conduisant à l'amorçage prématuré de fissures. [11]

I.3.4- Brunissage

Le brunissage ou le traitement de finition par pression est un procédé de traitement à froid sans enlèvement de matière. Son principe est basé sur les propriétés des matériaux et leur aptitude à la déformation élasto-plastique de la couche superficielle. Sous la pression des métaux durs, des alliages durs ou diamant, de l'outil (bille, galet, pointe sphérique), les microreliefs de départ de la pièce se déforment plastiquement, se compriment en formant un nouveau microrelief avec plus de régularité. [16]

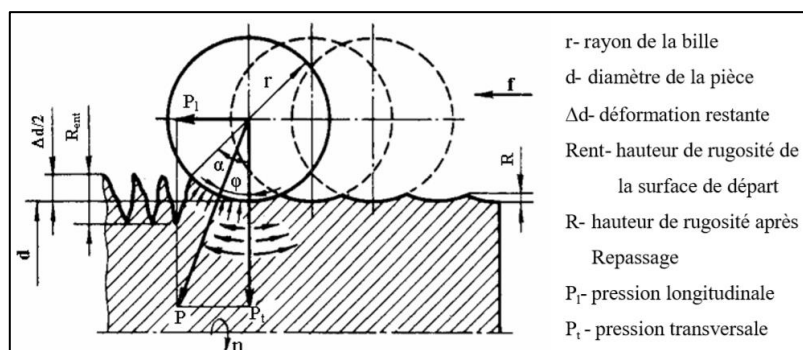


Figure 13-Schéma de la déformation des irrégularités de surface lors d'un traitement par

bille [16]

I.3.1.4.1- Outils de brunissage

Le dispositif a été conçu pour réaliser les opérations de brunissage à la bille ou au rouleau (galet) sur un tour parallèle. Il présente l'avantage d'une simplicité de son montage sur la tourelle du tour. Le mouvement de pénétration est obtenu par l'action de la pointe en diamant du brunissoir sous l'effet d'un effort réglable. La déformation est obtenue par la rotation de la pièce et l'avance de l'outil qui est communiqué par l'intermédiaire du chariot longitudinal. L'effort « P_y » étalonné sur le dispositif est réglé à l'aide du vernier de la machine-outil. [16]

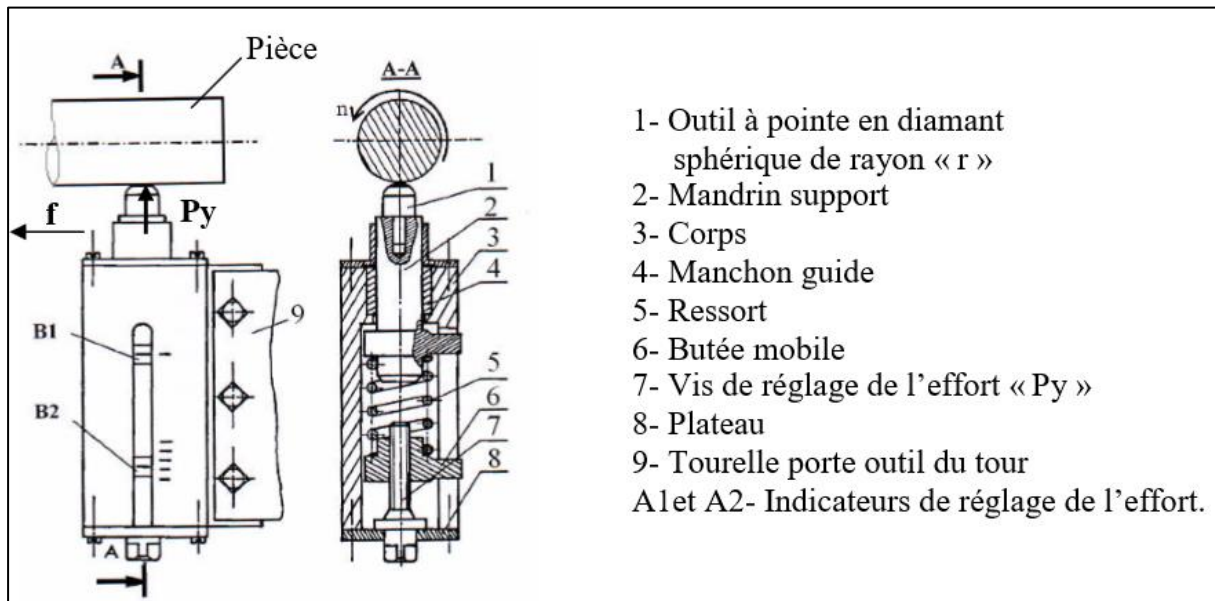


Figure 14- Outils de brunissage (Brunissoir) [16]

I.3.1.4.2- Principe de fonctionnement

Le brunissage se fait à l'aide d'une pointe en diamant ou avec une bille en acier trempé ou en carbure métallique. Il constitue une opération simple à exécuter, vu qu'elle peut être réalisée sur des machines-outils aussi bien classique (tour, fraiseuse, etc.), que spéciales (galetage). Le procédé intéresse aussi bien les surfaces extérieures que les surfaces intérieures. Et peut être appliqué sur des pièces de haute dureté pouvant atteindre jusqu'à plus de 50HRC. [22]

I.3.5- Choc Laser

Un laser de « choc » est une source laser de traitement de surface. Donc elle utilise un faisceau laser en mode pulsé (non continu) et déclenché pour avoir une durée d'impulsion faible, de l'ordre de la nanoseconde (Q-switch). Ce traitement par choc laser (Laser Shock Peening (LSP) repose sur la génération d'ondes de chocs sur la surface du matériau à contraindre. Le but étant ici de comprimer l'extrême surface de la pièce et d'amener à un dépassement surfacique local de la limite d'élasticité du matériau et non d'échauffer le matériau comme c'est le cas avec un traitement de surface par marquage ou par ablation.

Ce traitement est surtout utilisé dans le même esprit que le grenailage : il permet d'augmenter les propriétés mécaniques de surface du matériau. Ainsi, il présente un intérêt pour l'anticorrosion aqueuse et l'anti piqûration. Cela s'effectue par la génération d'impulsions courtes à la surface du matériau. L'interaction faisceau/matière va conduire à la

formation d'un plasma local de très courte durée (quelques microsecondes) qui va générer des ondes de chocs à l'intérieur du matériau. Généralement, ce traitement est effectué avec un laser dit solide à quatre niveaux d'énergie, à savoir le ND : YAG. [9]

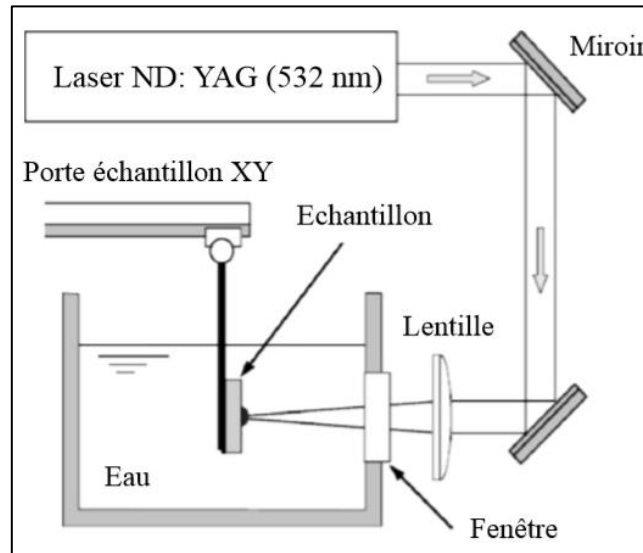


Figure 15-Schéma du dispositif classique de traitement de choc laser [9]

I.3.6- Tribofinition

Le mot « tribofinition ». Il est composé de deux parties, « tribo », qui vient du latin et qui veut dire frotter, et « finition », qui est l'opération servant à améliorer l'état de surface des pièces pour qu'elles puissent répondre à des conditions de fonctionnement précises. On peut donc dire que la tribofinition est l'opération qui sert à améliorer l'état de surface des pièces par frottement. La tribofinition est un procédé de traitement mécanique de surface qui a pour but d'enlever les toutes petites particules du métal et ses oxydes dans un milieu actif contrôlé (medias-additifs chimiques).

L'objectif de ce procédé est d'améliorer les caractéristiques géométriques, mécaniques et métallurgiques, à savoir, l'état de surface (diminution de la rugosité), la dureté et la micro-dureté de la couche superficielle, la tenue en fatigue des matériaux (durabilité des matériaux), la taille des grains pour les matériaux poly-cristallins.

Ce procédé est caractérisé par les propriétés physiques des medias, les caractéristiques du matériau de la pièce à traiter, les paramètres dynamiques du processus qui reflètent le régime du traitement, la composition, les propriétés et la qualité de l'additif chimique. La particularité de ce procédé par rapport aux autres traitements consiste dans le traitement des pièces de configuration géométriques très complexes.

Les équipements les plus utilisés dans la tribofinition sont principalement les vibrateurs linéaires, les vibrateurs circulaires, les vibrateurs de Smuritropie et les machines centrifugeuses à fond tournant. [21]

A savoir aussi :

- La tribofinition s'est inspirée de la nature où l'écoulement constant de l'eau transforme par érosion les pierres brutes en galets parfaitement polis.

- La tribofinition est utilisée par les anciennes civilisations (égyptienne, grec ...etc.) pour traiter leurs armes et bijoux.
- Pour l'industrie la tribofinition exploite les phénomènes de friction dans un environnement chimique contrôlé.
- Pour les abrasifs il en existe plus de 6500 modèles différents et leur taille peut être inférieure au dixième de millimètre.



Figure 16-Traitement par tribofinition [33]

I.3.6.1- Domaine d'application des procédés de tribofinition

Les procédés de tribofinition sont destinés principalement aux pièces dont la configuration géométrique est très complexes, grâce aux médias qui, dépendamment de leurs tailles et géométries, peuvent atteindre des endroits qu'on ne pourra pas atteindre avec les machines classiques, (Voir chapitre III.2). Cependant la tribofinition est destinée pour réaliser les opérations d'ébavurage, ébarbage, rayonnage, nettoyage, décalaminage, décapage, brillantage, polissage, marinage, passivation, lissage, super finition et de durcissement superficiel.

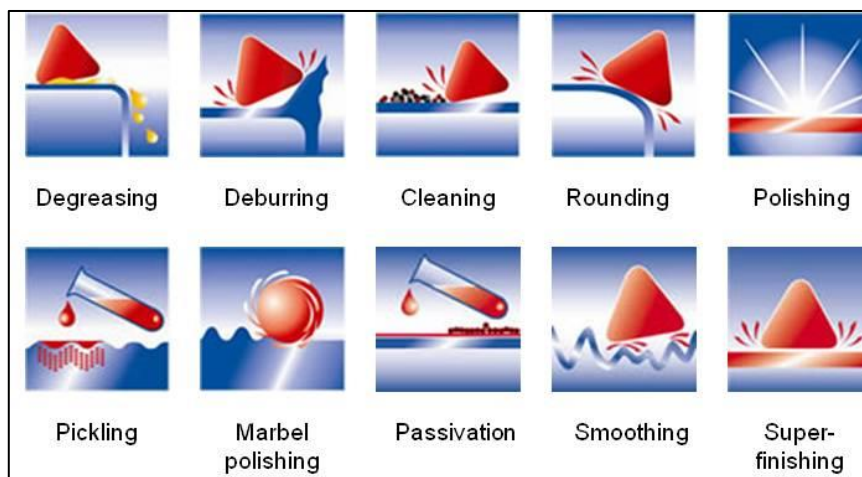


Figure 17-Opérations réalisées par tribofinition [38]

CHAPITRE I : Notions fondamentales sur les traitements de surface

L'ébavurage est une opération qui consiste à éliminer les bavures résiduelles sur une pièce.

L'ébarbage est une opération qui consiste à ôter les parties excédantes et superflues d'une pièce

Le rayonnage est une opération de tribofinition qui consiste à adoucir ou rayonner l'ensemble des arrêtes d'une pièce.

Le décalaminage est une opération qui consiste à nettoyer des pièces grâce aux additifs chimiques.

Le décapage est un procédé qui consiste à éliminer une couche de matière déposée (volontairement ou non) sur la surface d'une autre matière.

Le brillantage permet d'obtenir un aspect brillant d'une pièce et d'éviter les problématiques d'oxydation.

Le polissage est une opération qui consiste rendre une pièce lisse et éventuellement brillante.

La passivation est une opération qui consiste à ralentir la vitesse de corrosion d'une pièce métallique ou en alliage.

I.3.6.2 Méthodes de tribofinition

Dans le domaine de traitement mécanique de surface, il n'existe qu'un seul procédé à savoir la tribofinition pouvant être utilisé dans sa large gamme et exclusivement pour des pièces de configuration complexes, afin d'avoir un meilleur état de surface de finition, un nombre important de quantité à traiter et un rapport prix qualité intéressant, tout cela dépend de plusieurs paramètres en l'occurrence, choix de la procédure à adopter, choix de la machine, choix des médias et d'additif chimique. Cependant il existe plusieurs méthodes de tribofinition qui se distinguent par le mouvement relatif entre médias et pièces.

- **Traitements par vibrations**

Cette méthode consiste à générer des vibrations provoquant un mouvement vibratoire, relatif entre les médias et les pièces à traiter, qui sert par conséquent à traiter les pièces par frottement, plusieurs équipement de tribofinition appelés « vibrateurs » utilisent cette méthode à savoir les vibrateurs linéaires, les vibrateurs circulaires...etc. (Voir Chapitre III.1.1)

Cette méthode assure une longue durée de vie des médias, cependant les durées des traitements sont longues (environs 3 à 4h) et les vibrations provoque un bruit énorme durant le traitement.

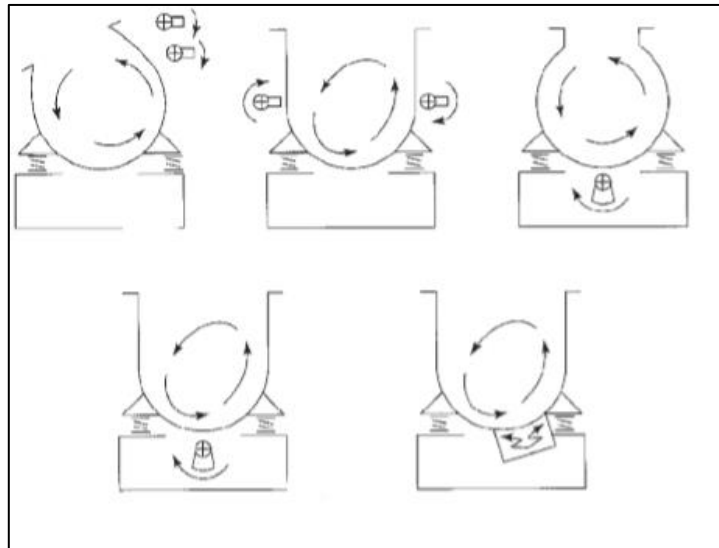


Figure 18-Traitements de tribofinition par vibrations [1]

- **Méthodes Smuritropie**

Le Smuritropie est une méthode de tribofinition qui consiste à fixer les pièces par une armature ou des axes eux-mêmes mis en rotation (Voir Chapitre III.1.2), dans ce cas, seul le mélange abrasif est en mouvement dans la cuve. Ce procédé permet d'éviter les chocs des pièces entre elles qui parfois causent des endommagements aux pièces.

Cette méthode est utilisée beaucoup plus pour les pièces fragiles et de valeur.

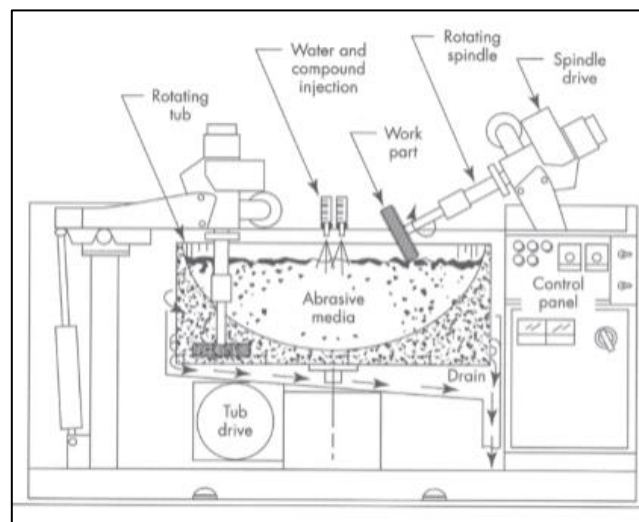


Figure 19- Traitements de tribofinition par Smuritropie [1]

- **Traitement par force centrifuge**

Pour cette méthode les médias suivent un mouvement rotatif ou de rotations composées ce qui permet d'obtenir un traitement plus rapide via des frottements entre les médias et la pièce à traiter, plusieurs équipements de tribofinition appelés « centrifugeuses » utilisent cette méthode à savoir les centrifugeuses à fond tournant, les centrifugeuses satellitaires, les centrifugeuses magnétiques et les tonneaux centrifuges. (Voir Chapitre III.1.3)

CHAPITRE I : Notions fondamentales sur les traitements de surface

Cette méthode est caractérisée par la rapidité des traitements (de 5 à 15 min), cependant la durée de vie des médias est courte.

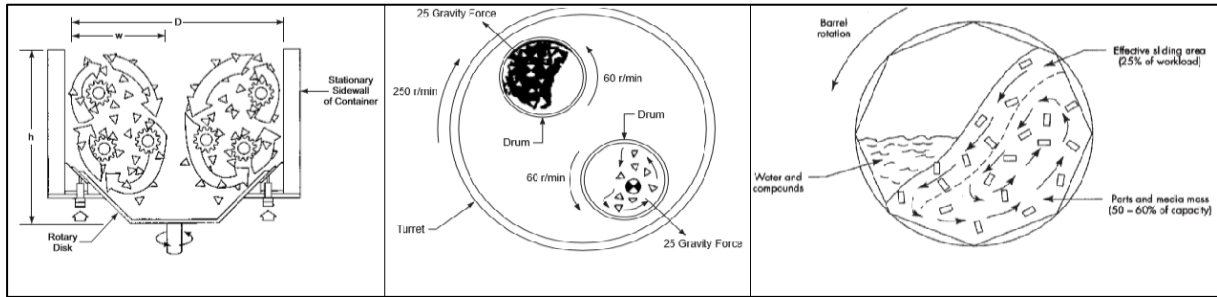


Figure 20- Traitements de tribofinition par force centrifuge [1]

I.3.6.3- Paramètres de la Tribofinition [20]

L'intensité du traitement par tribofinition dépend du régime du traitement (fréquence ou vitesse de rotation, durée du traitement, taille et forme des particules), et de plusieurs autres paramètres. Les pièces sont caractérisées par leur milieu d'utilisation et les conditions de travail.

Ces paramètres sont physico-mécaniques :

- Force de l'impact,
- Vitesse et l'accélération des particules,
- Pression de contact, les contraintes et l'énergie de l'impact,
- Température dans la chambre du travail.

On définit ces paramètres pour la machine centrifuge.

• Force centrifuge [7]

La **force centrifuge** ou l'**effet centrifuge**, est l'effet ressenti lors d'un mouvement de rotation d'un référentiel non inertielle, un corps subissant cette force a tendance de s'éloigner du centre de rotation et de se pousser radialement vers l'extérieur.

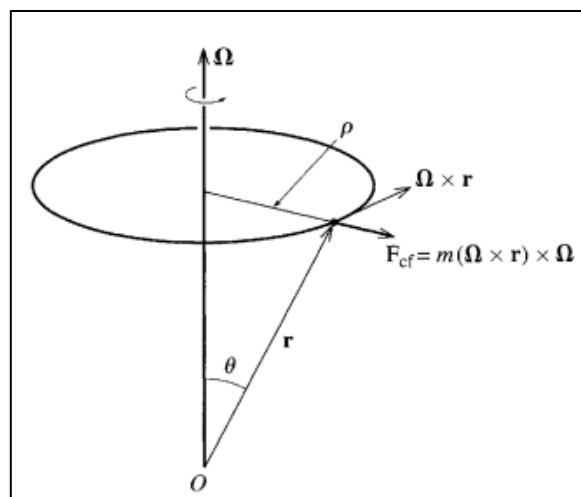


Figure 21- Force centrifuge [7]

CHAPITRE I : Notions fondamentales sur les traitements de surface

L'expression générale de la force centrifuge est donnée par l'expression vectorielle suivante

$$\vec{F}_{cf} = m(\vec{\Omega} \times \vec{r}) \times \vec{\Omega} \quad (1)$$

Pour notre cas (centrifugeuse à font tournant) nous avons le rayon r et l'axe de rotation qui sont perpendiculaire ce qui nous donne l'expression suivante

$$F_{cf} = m \cdot r \cdot \Omega^2 \quad (2)$$

Ou

m : Masse des particules [m]

r : Position radiale par rapport au centre de rotation [m]

Ω : Vitesse angulaire [rad/s]

On peut dire que la force d'impact pour le cas d'un traitement par force centrifuge est égale à cette dernière.

On remarque que cette force augmente beaucoup plus avec l'augmentation de la vitesse de rotation, comme elle devienne importante lorsqu'on s'éloigne du centre de rotation ou bien lorsqu'on augmente la masse.

- **Accélération d'impact** [7]

Dans ce cas l'expression de l'accélération des particules pour une vitesse angulaire constante est donnée par

$$a_{cf} = r \cdot \Omega^2 \quad (3)$$

- **Vitesses d'impact** [7]

Nous avons deux composantes de vitesse, la composante radial du a l'accélération centrifuge qui dépend du temps et qui est donnée par

$$V_{cf} = r \cdot \Omega^2 \cdot t \quad (4)$$

V_{cf} : Vitesse radiale [m/s]

t : Temps [s]

Et la composante angulaire qui est donnée par

$$V_{\theta} = r \cdot \Omega \quad (5)$$

V_{θ} : Vitesse angulaire [m/s]

Donc la vitesse totale est donnée par

$$V = \sqrt{V_{cf}^2 + V_{\theta}^2} = r\Omega \cdot \sqrt{\Omega^2 \cdot t^2 + 1} \quad (6)$$

CHAPITRE I : Notions fondamentales sur les traitements de surface

La vitesse d'impact est égale à la vitesse de déplacement multiplié par le coefficient de perte de vitesse

$$v_i = k_v \cdot V = k_v \cdot r\Omega \cdot \sqrt{\Omega^2 \cdot t^2 + 1} \quad (7)$$

v_i : Vitesse d'impact [m/s]

k_v : Coefficient de perte de vitesse

- **Energie d'impact**

Elle est déterminée par la formule suivante

$$E = \frac{HB \times d^2}{6D} \quad (8)$$

Avec :

HB : Dureté Brinell du matériau,

d : Diamètre de l'empreinte (mm),

D : Diamètre de la bille (mm).

- **Pression d'impact dans la zone de contact**

$$P_{cmax} = \frac{3}{2} \times \frac{F}{\pi ab} \quad (9)$$

Avec

$$\begin{cases} a = \theta_1 \left[\frac{3}{8} \times \frac{F}{\sum \rho} (\theta_1 + \theta_2) \right]^{\frac{1}{3}} \\ b = \theta_2 \left[\frac{3}{8} \times \frac{F}{\sum \rho} (\theta_1 + \theta_2) \right]^{\frac{1}{3}} \end{cases}$$

Où

F : Force de l'impact [N],

a, b : Dimensions de demi-axe de la surface de contact [mm],

θ_1, θ_2 : Coefficients d'élasticité qui caractérisent les propriétés d'élasticité du matériau des objets de l'impact,

$\sum \rho$: Somme des valeurs des rayons de courbure principale des surfaces de contact.

- **Température dans la zone d'impact**

Le phénomène thermique est considéré comme un résultat de la collision des matériaux. Celle-ci engendre de la chaleur dans la zone de l'impact et elle est déterminée sur la base de l'évolution de l'énergie cinétique dans un environnement en traitant la surface au moment de l'impact.

La température dans la zone d'impact est donnée par

$$T = \frac{m \times v_i^2}{2} \times \frac{1}{427} \times \frac{1-k^2}{c_s \times \gamma \times n \times \mu} \quad (10)$$

Avec

$$\mu = \frac{\pi r^4}{4R}$$

Ou

μ : Volume de l'empreinte.

v_i : Vitesse d'interaction des medias et des pièces à traiter (m/s).

cs : Chaleur spécifique.

γ : Densité du matériau.

n : Coefficient de proportionnalité.

μ : Rayon de l'empreinte.

R : Rayon de la bille (les media du milieu actif).

m : Masse des particules.

k : Coefficient de régénération (récupération)

Conclusion

Le premier chapitre est consacré pour les notions fondamentales sur les traitements de surface d'une manière générale et pour les traitements mécaniques de surface en particulier. Parmi les traitements de surfaces chimiques, nous avons cité, (la chromatisation, la phosphatation et le zingage) et traitements thermochimique (cémentation, nitruration, carbonitruration) et enfin les traitements mécaniques de surface (TMS), en l'occurrence le grenailage, le galetage, le martelage, le brunissage, le choc Laser et en particulier le traitement de tribofinition, qui est le procédé le plus utilisé dans le domaine de toutes les industries. Cette technique s'applique beaucoup plus à des fins multiples et aussi pour des pièces de formes géométriques simples et complexes afin d'améliorer leurs caractéristiques géométriques, mécaniques et métallurgiques.

Et en fin nous avons évoqué le domaine d'application, les opérations qui peuvent être réalisé par le procédé de tribofinition et les différentes méthodes utilisées pour ce procédé.

Chapitre II

Frottement et usure

Introduction

Le traitement par le procédé de tribofinition en utilisant la centrifugeuse à fond tournant se fait grâce aux frottements dues au contact direct entre les médias et les pièces à traiter, ce traitement améliore l'état de surface des pièces mécaniques ce qui engendre une amélioration de la résistance à l'usure.

L'avantage de cette technique est d'obtenir des résultats significatives à partir de dix minutes de traitement, par contre les autres traitements nécessitent au moins 30 minutes de traitement pour avoir les mêmes résultats, l'inconvénient de cette méthode est l'usure rapide des médias suite à la grande vitesse de rotation utilisée afin d'intensifier le traitement.

Ce chapitre est consacré pour les généralités sur les frottements et l'usure ainsi que leurs applications en le domaine de la tribofinition.

II.1- Frottement :

II.1.1- Lois et mécanismes du frottement

La force appelée frottement peut être définie comme la résistance rencontrée par un corps lorsqu'il se déplace par-dessus d'un autre. [6]

Lorsque deux solides 1 et 2 sont mis en contact par une force normale F , une force tangentielle T apparaît naturellement si on cherche à déplacer les solides l'un par rapport à l'autre. Cette force tangentielle est appelée force de frottement. Sur la figure 22, la force T correspond à $T_{2 \rightarrow 1}$ et la vitesse de glissement V à $V_{1/2}$.

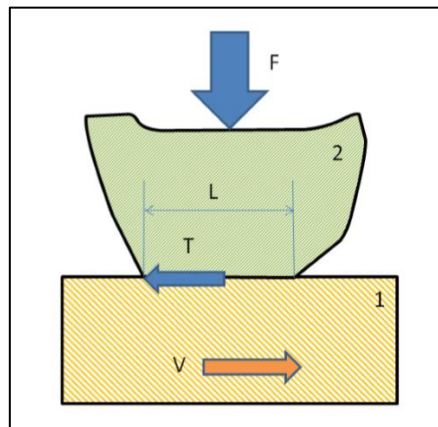


Figure 22- Contact entre deux solides en présence de frottement [5]

On définit généralement un facteur de frottement f tel que :

$$f = \left| \frac{T}{F} \right| \quad (11)$$

On identifie deux situations :

- Lorsque $V \neq 0$, on parle de frottement dynamique et $|T| = f|F|$
- Lorsque $V = 0$, on parle de frottement statique et $|T| < f|F|$

Nous nous intéresserons principalement au cas du frottement dynamique.

Le frottement dynamique fait intervenir des phénomènes dissipatifs. Il n'est donc pas dû à des déformations élastiques ou des phénomènes réversibles. Pour de nombreux matériaux, la force de frottement dynamique peut être expliquée par des forces adhésives T_a et des forces de déformation plastique T_d :

$$T = T_a + T_d = (f_a + f_d)F \quad (12)$$

II.1.2- Contribution adhésive au frottement

Si une surface lisse glisse sur une autre surface relativement lisse de sorte que la contribution de la déformation au frottement soit négligeable, la force de frottement provient principalement de l'adhérence entre les deux surfaces [6]

Dans les zones où les surfaces solides sont en contact intimes, des forces d'adhésion dues aux interactions atomiques se développent. Pour rompre ces liaisons, une contrainte de cisaillement τ_a est nécessaire. La force totale permettant de rompre les liaisons est donc le produit de cette contrainte par l'aire totale de contact A (définie sur la figure 23) :

$$T_a = \tau_a A \quad (13)$$

Le facteur de frottement adhésif s'exprime donc :

$$f_a = \frac{\tau_a A}{F} \quad (14)$$

La pression moyenne de contact, c'est à-dire le rapport entre la force normale et l'aire réelle de contact F/A , est alors égale à la dureté H du matériau le plus mou. Dans ce cas, le facteur de frottement s'exprime :

$$f_a = \frac{\tau_a}{H}$$

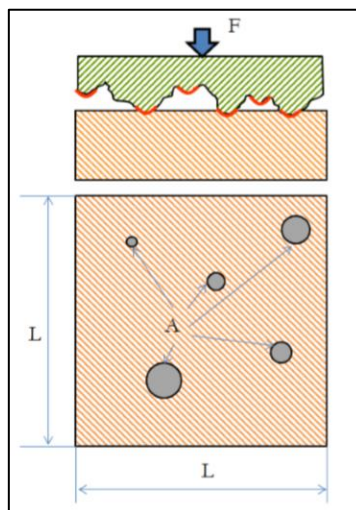


Figure 23- Aire de contact entre deux solides [5]

CHAPITRE II : Frottement et usure

Matériau	Symbole	$\gamma(mJ/m^2)$	$E(GPa)$	ν	$H(GPa)$	$d(nm)$	f expé.
Aluminium	Al	840	62	0.346	0.15	0.4	1.4
Cuivre	Cu	1100	128	0.33	0.35	0.36	0.75
Chrome	Cr	2400	289	0.21	8	0.28	0.3
Fer	Fe	2550	208	0.25	1.2	0.28	0.75

Tableau 1- Paramètres utilisés pour l'évaluation du coefficient de frottement adhésif [5]

II.1.3- Contribution plastique au frottement

Plaçons-nous dans une situation idéale où un matériau infiniment rigide de surface rugueuse glisse sur un matériau mou de surface lisse. Comme le montre la figure 24, les aspérités de la surface dure vont laisser des sillons sur la surface molle. Il est possible d'estimer le frottement en calculant la force nécessairement à l'écoulement plastique du matériau mou.

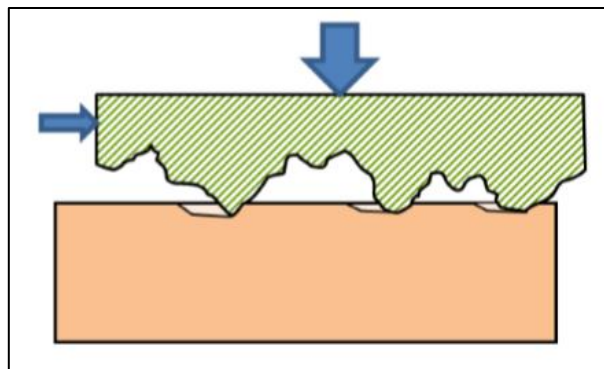


Figure 24- Frottement résultant de la déformation plastique d'un matériau [5]

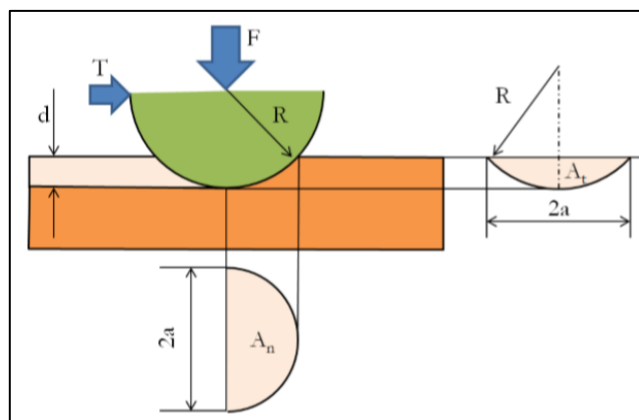


Figure 25- Sphère rigide frottant sur un matériau déformable [5]

La pression de contact est donc égale à la dureté H du matériau mou. Les forces s'expriment donc :

$$F = HA_n \quad (15)$$

Et

$$T = HA_t \quad (16)$$

Où A_n et A_t sont les aires de contact projetées dans la direction normale et tangentielle, comme indiqué sur la figure 25.

Le coefficient de frottement est alors égal au rapport des deux aires. Donc le cas, où le rayon de contact a est petit devant le rayon R de la sphère, on montre que :

$$f_p = \frac{A_t}{A_n} \approx \frac{4a}{3\pi R}$$

Le rayon de contact a n'est pas une constante et dépend de la force appliquée, F :

$$a = \sqrt{\frac{2F}{H\pi}}$$

Le facteur de frottement s'exprime finalement :

$$f_p = \frac{A_t}{A_n} = \frac{4\sqrt{\frac{2F}{H\pi}}}{3\pi R} \quad (17)$$

II.1.4- Cas de frottement [34]

D'un point de vue scientifique général, le frottement entre deux surfaces frottantes est souvent décrit au moyen de quatre comportements typiques : le frottement sec, le frottement onctueux, le frottement mixte et le frottement hydrodynamique.

I.1.4.1- Frottement sec

Dans le cas du frottement sec, il n'y a pas de lubrifiant entre les surfaces en contact. Le glissement y est le plus difficile et l'usure la plus rapide. De plus, le frottement sec est caractérisé par des contacts locaux fréquents sur les aspérités des surfaces, des échauffements, des arrachements et des microsoudures.

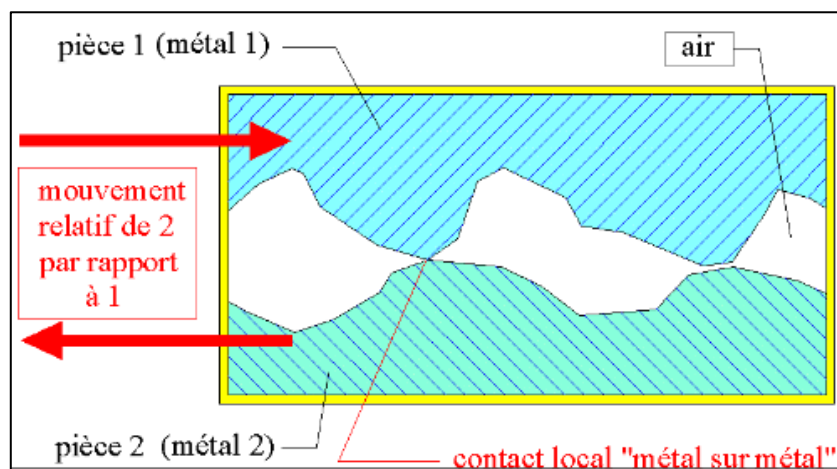


Figure 26- Cas du frottement sec

II.1.4.2- Frottement onctueux

Dans le cas du frottement onctueux, un film de lubrifiant recouvre les surfaces en contact sous la forme d'une très fine couche (épilamen ou couche moléculaire). Le frottement est diminué ($f \approx 0,03$ à $0,2$) et le glissement favorisé. Les contacts locaux directs (sans épilamen) sont plus rares, il y a moins d'arrachements, de microsoudures et d'usure.

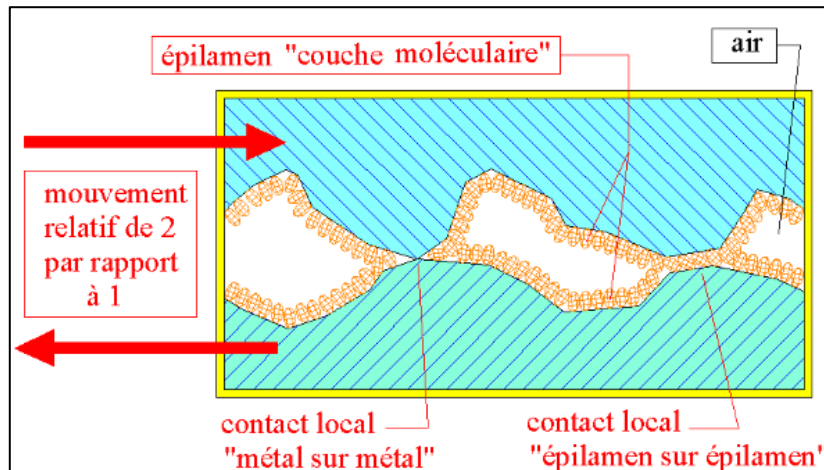


Figure 27- Cas du frottement onctueux

II.1.4.3- Frottement hydrodynamique

Dans le cas du frottement hydrodynamique, il n'y a plus aucun contact entre les surfaces, celles-ci sont toujours séparées par une couche de lubrifiant d'épaisseur e de $0,02$ à $0,008$ mm (ou ≈ 100 fois supérieure à la hauteur des aspérités des surfaces). Le mouvement, à condition que la vitesse soit suffisante et la viscosité adaptée, crée une portance hydrodynamique. Le frottement est très réduit ($f \approx 0,002$ à $0,01$) et l'usure pratiquement nulle.

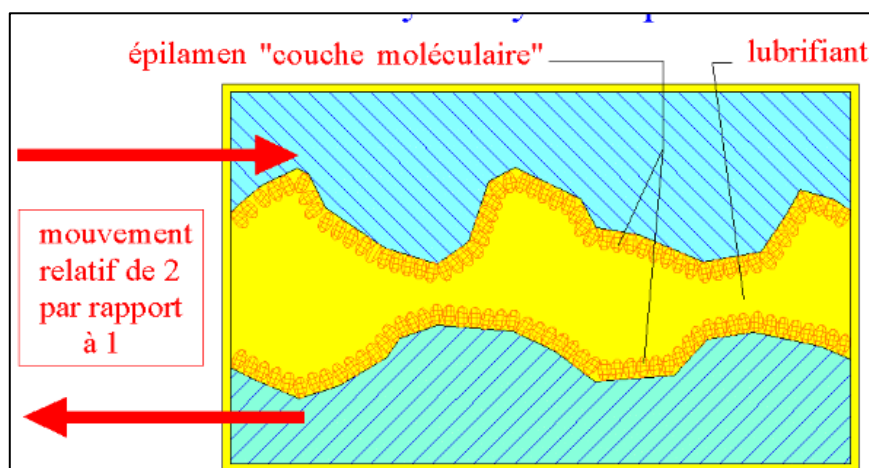


Figure 28- Cas du frottement hydrodynamique

II. 1.4.4- Frottement mixte

Le frottement mixte est un mélange de frottement onctueux et de frottement hydrodynamique, caractérisé par une portance hydrodynamique intermittente avec quelques contacts locaux épilamen sur épilamen. Le frottement et l'usure sont réduits par rapport au régime onctueux ($f \approx 0,01$ à $0,1$).

II.1.5- Mesure du frottement

Le facteur de frottement se mesure au moyen d'un tribomètre. La figure 29 présente un tribomètre pion-disque qui est parmi les appareils les plus couramment utilisés. Il se compose d'un arbre en rotation à vitesse variable sur lequel se fixe un disque constituant le premier matériau à tester. Un pion réalisé avec le deuxième matériau du couple tribologique se monte sur un support équipé d'un capteur de force normale et tangentielle. Une force normale est appliquée au support de manière à presser le pion sur le disque. Puis le disque est mis en rotation et la force tangentielle est mesurée. [5]

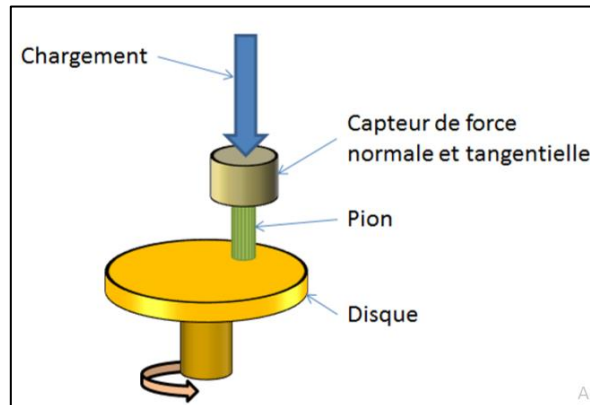


Figure 29- Tribomètre de type pion-disque [5]

Le tableau 2 présente des valeurs de coefficient de frottement pour les couples de matériaux usuels.

Matériaux	f_s	f_d
Acier / Acier	0.2 - 0.8	0.2 - 0.8
Aluminium / Acier	≥ 0.8	≥ 1
Aluminium / Aluminium	1	0.8
Cuivre / Acier	0.5	0.45
Chrome / Acier dur	0.4	0.4
Garniture de frein / Acier	0.3-0.4	0.25 - 0.35
Graphite / Acier (dans l'air)	0.1	0.1
Laiton / Acier	0.5	0.45
PTFE / Acier	0.05 - 0.1	< 0.1
Caoutchouc / Metal	≈ 1	$\approx 0.5 - 1.5$
Caoutchouc / Route	≈ 1	0.5 - 0.6
Polyéthylène / Acier	0.15 - 0.2	0.1 - 0.15

Tableau 2- Valeurs indicatives de coefficients de frottement statique et dynamique de matériaux usuels en frottement à sec [5]

Ces valeurs sont à utiliser avec précaution car elles peuvent varier sensiblement avec l'environnement, la vitesse de glissement, la charge.

II.2- Usure

L'usure d'un solide est généralement défini comme une perte de matière, un mouvement de matière ou une transformation de matière en surface du solide sous l'effet d'une interaction avec un autre milieu (solide dans notre cas, mais ça peut également être un fluide). [5]

Nous même on s'use, les matériaux aussi, c'est-à-dire lorsqu'on frotte un matériau sur un autre, en principe, il va perdre un peu de masse. C'est aussi un mécanisme qui avec la corrosion va gentiment nous amener à devoir changer de pièces dans un dispositif.

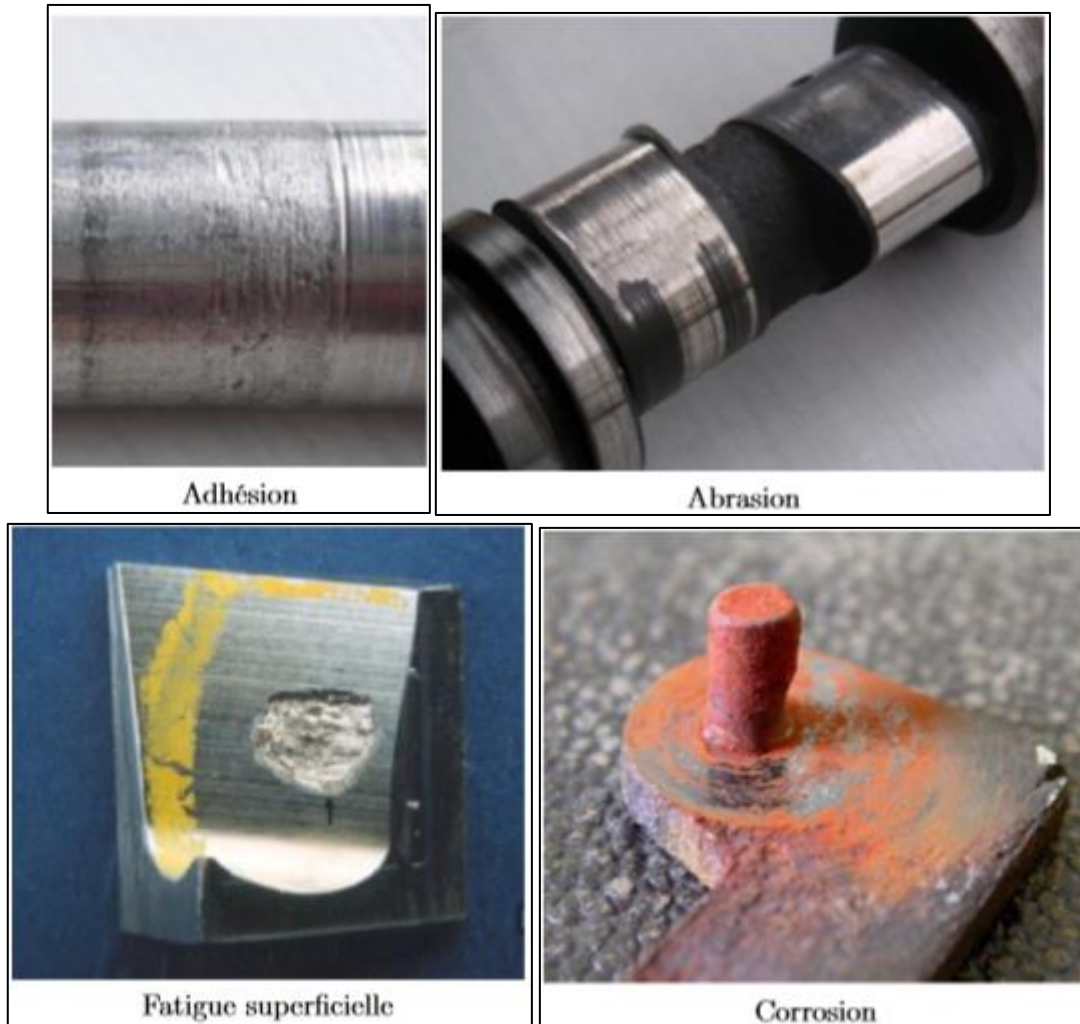


Figure 30- Exemples de surfaces usées par différents mécanismes [5]

II.2.1- Mécanisme d'usure [3]

Si nous avons un pion qu'on frotte sur une surface (matériau de base, figure 31) et qu'après une certaine distance L de propagation, la partie inférieure enlevée, avec un Δh , le taux d'usure est le volume enlevé divisé par la longueur L .

$$w = \frac{\Delta V}{L} = \frac{A \cdot \Delta h}{L} \quad (18)$$

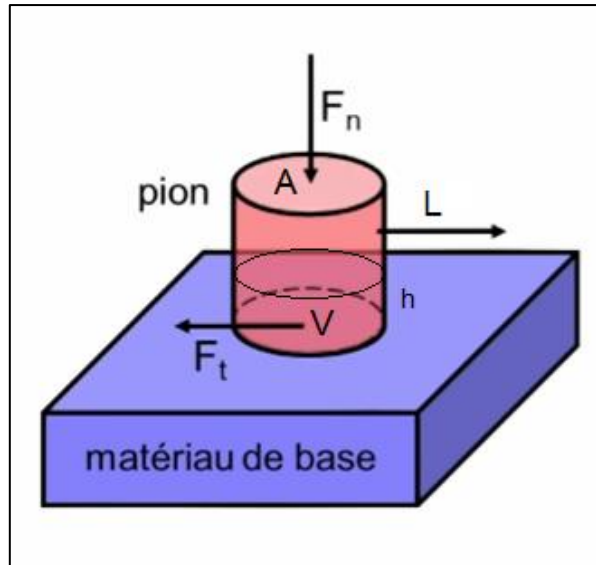


Figure 31- frottement d'un pion sur un matériau de base

Le taux d'usure normalisé par la surface A donne le taux d'usure spécifique

$$\Omega = \frac{w}{A} = \frac{\Delta V}{A.L} = \frac{\Delta h}{L} \quad (19)$$

Ce taux spécifique est alors proportionnel à la pression appliquée

$$\Omega = \frac{\Delta h}{L} = k_a \cdot P = k_a \cdot \frac{F_n}{A} \quad (20)$$

k_a : Coefficient d'Archard,

Le Coefficient d'Archard facteur dépend de nombreux facteurs telle que l'état de surface (rugosité), lubrification, présence des débris entre les deux pièces, la nature de la contre pièce...etc.

En réalité les contacts ne sont pas de surface à surface mais d'aspérité à aspérité

L'usure entre deux surfaces se fait via des points de contact et donc dépend de leur rugosité (figure 32)

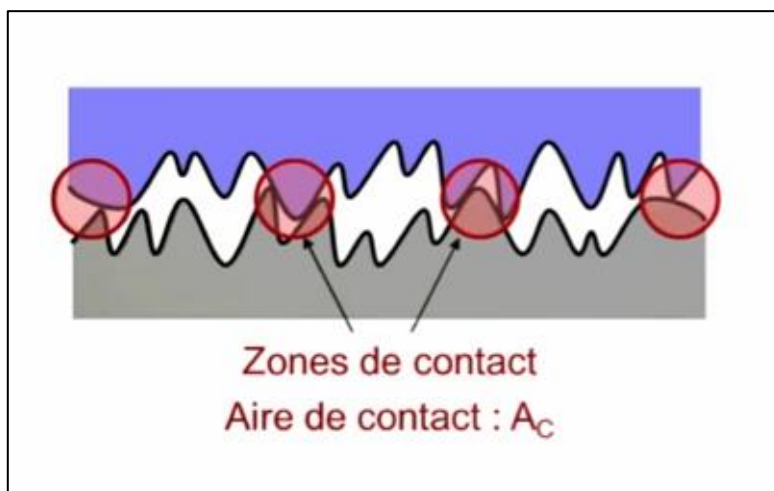


Figure 32- frottement d'un pion sur un matériau de base

En supposant que la limite élastique est atteinte aux points de contact, on a :

$$\sigma_{el} = \frac{F_n}{A_c} = P \frac{A}{A_c} \quad (21)$$

A : Aire appliquée (totale).

A_c : Aire de contact.

Le taux d'usure d'un matériau est proportionnel à la pression appliquée et à son coefficient d'Archard. Ce dernier est d'autant plus faible que la dureté du matériau est élevée, mais dépend fortement de l'autre corps, des états de surface et de lubrifiant.

II.2.2- Usure adhésive

Les forces d'adhésion se développent entre les surfaces mises en contact. La rupture de ces liaisons adhésives nécessite d'exercer une contrainte de cisaillement τ_a , à l'origine du frottement. Elle peut s'exprimer :

$$\tau_a = f_a p_m \quad (22)$$

Où

p_m : La pression moyenne de contact et

f_a : Contribution adhésive du coefficient de frottement.

L'usure adhésive se caractérise donc par des arrachements de matière irréguliers sur les surfaces (voir figure 33). Les particules d'usure arrachées du matériau le plus tendre vont adhérer sur l'antagoniste. Le matériau le plus tendre va donc se retrouver à frotter contre lui-même. D'autre part, la topographie des surfaces et donc les pressions de contact vont changer.

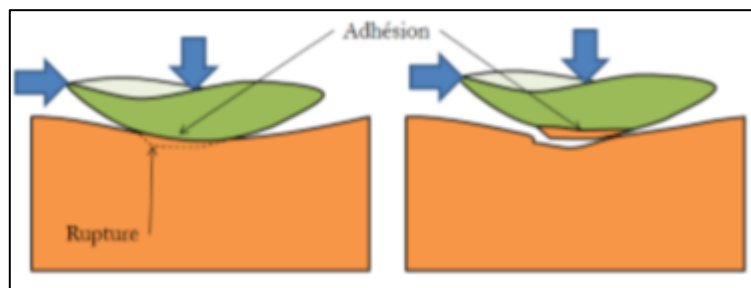


Figure 33- Mécanisme de l'usure adhésive [5]

Lorsque les pressions de contact sont élevées et que les matériaux ont un travail d'adhésion élevée, il est possible d'atteindre un régime sévère d'adhésion où les surfaces sont soudées. Le mécanisme est alors complètement bloqué, on parle de grippage. La figure 34 présente un exemple de grippage qui s'est produit entre deux solides en acier inoxydable.

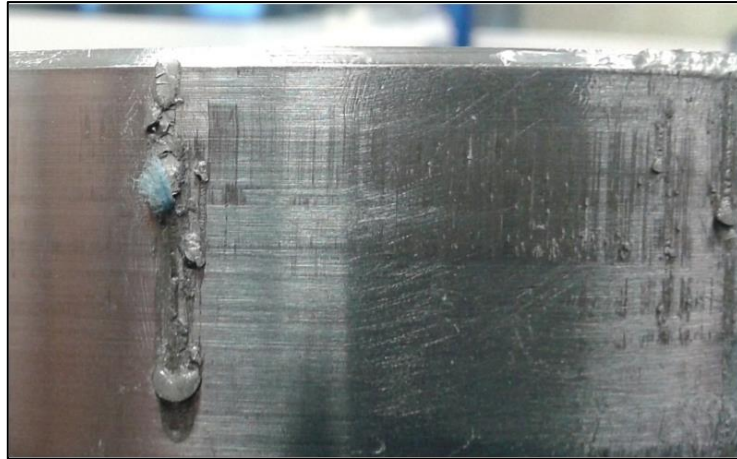


Figure 34- Exemple de grippage, manifestation sévère de l'usure adhésive [5]

II.2.3- Usure abrasive

L'usure abrasive est due au contact entre une particule et la surface d'un solide. Lors de son passage dans le contact, cette particule peut enlever de la matière selon quatre modes d'enlèvement de matières (Figure 35). Elle peut :

- couper, si elle est suffisamment aiguisée,
- repousser la matière en surface,
- provoquer une fracture, si le solide est fragile,
- enlever des grains, si le matériau est suffisamment homogène.

Ces deux derniers modes se produisent plus rarement que les deux premiers.

La nature de l'usure abrasive est aussi déterminée par le mode d'acheminement des particules dans le contact.

Si les particules sont fixées à l'une des deux surfaces, il s'agit d'abrasion à deux corps.

Si les particules sont libres de rouler ou de glisser par rapport aux deux surfaces, on parle alors de l'abrasion à trois corps.

L'usure abrasive implique donc un déplacement de matière par labourage d'au moins une des surfaces en contact. Ce mécanisme est important, que ce soit lorsqu'un matériau rugueux et dur glisse sur un matériau mou, ou lorsque des poudres sont présentes dans le contact des deux solides. Les cicatrices d'usure sont, dans les deux cas, constituées de sillons longilignes dirigés dans le sens du glissement. [4]

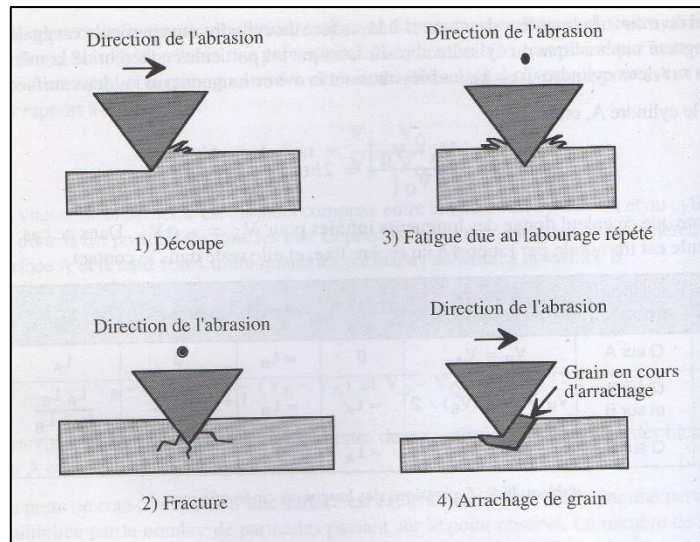


Figure 35- Les quatre modes d'usure abrasive [4]

II.2.4- Mesure de l'usure

L'usure est généralement mesurée au cours d'un test de frottement sur un tribomètre. Des techniques simples de mesure d'usure permettent d'évaluer la quantité de matière enlevée :

- Pesée : pesée de l'échantillon avant et après le test de frottement au moyen d'une balance de précision ;
- Mesure de cote : Mesure de la variation de longueur d'un échantillon avant et après le test de frottement, dans le cas d'une usure uniformément répartie ;
- Mesure du volume usé : Mesure de topographie avant et après test pour évaluer le volume enlevé pour créer la piste d'usure.

Les outils de mesure de topographie de surface, permettent d'évaluer les hauteurs d'une surface après usure comme sur les exemples de la figure 36.

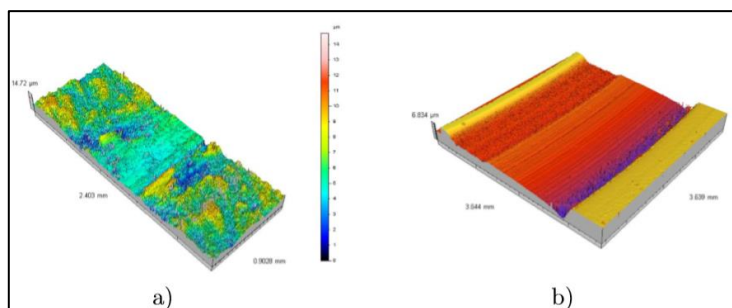


Figure 36- Exemples de piste d'usure a) Piste en acier après frottement avec un pion en acier

b) Piste d'une garniture mécanique après frottement [5]

Il est ensuite possible de tracer des profils à différents endroits pour mesurer l'aire de la piste d'usure puis le volume de matière enlevée (figure 37). Notons qu'on peut aussi observer une augmentation de volume ou de masse en raison des transferts de matière dus à l'adhésion. Il est alors difficile de mesurer effectivement l'usure.

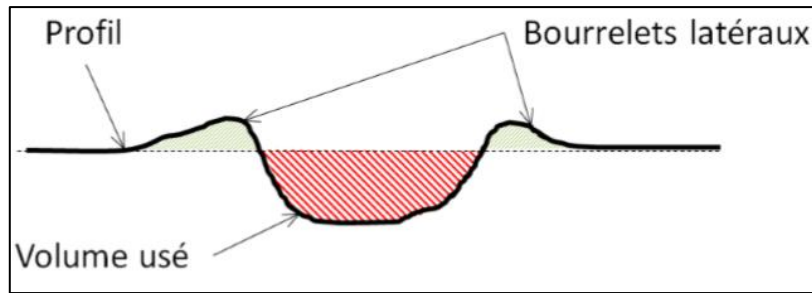


Figure 37- Mesure du volume d'usure

En mesurant le volume de matière usée à différents instants au cours d'un test tribologique, il est possible d'évaluer le coefficient d'usure K . Le tableau 3 donne des valeurs indicatives pour des couples de matériaux usuels. Ces valeurs sont à utiliser avec précaution car elles peuvent varier de façon notable suivant les conditions de fonctionnement.

Matériaux	K ($mm^3/N.m$)
Métal / Métal	$10^{-3} - 10^{-4}$
Polymère / Métal	$10^{-4} - 10^{-5}$
Composites+lubrifiant solides / Métal	$10^{-5} - 10^{-7}$
Garniture de frein / Métal	$10^{-4} - 10^{-5}$

Tableau 3- Valeurs indicatives de coefficients de coefficient d'usure K de matériaux usuels en frottement à sec

II.3- Usure en tribofinition

II.3.1- Contact de hertz [25]

Lorsqu'on presse une sphère « dure » sur un plan constitué d'un matériau « mou », on constate une déformation localisée autour du point théorique de contact, ainsi qu'une augmentation de la surface réelle de contact (Figure 38).

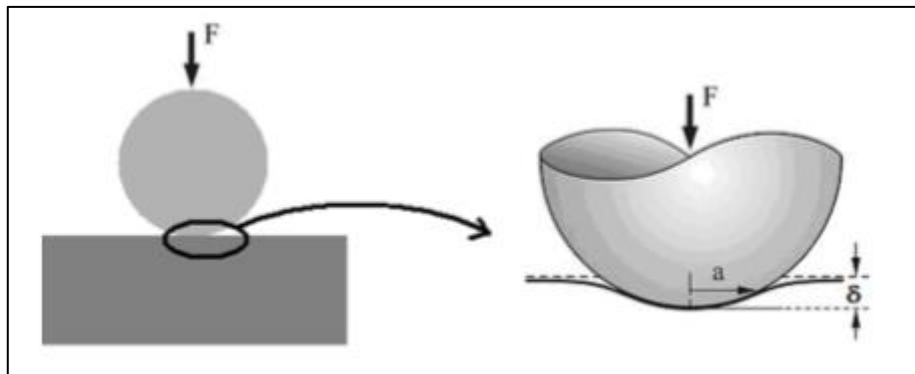


Figure 38- Déformation locale

- **Hypothèses du contact d'Hertz**
- Solides massifs : les déformations sont négligeables en dehors de la zone de contact,

- Déformations élastiques (réversibles),
- Pas de frottement au contact (pas d'effort tangentiel),
- Pas de mouvement relatif entre les deux solides.

- **Zone de contact**

La Figure 39 indique le comportement observé pour un contact nominal ponctuel et convexe entre deux solides quelconques. Deux éléments sont observables et mesurables :

- une surface de contact elliptique et orientée d'une façon particulière, nouvel élément géométrique définissant le contact sous charge (dans le plan π , définie par a , b et ϕ). Voir Figure 40 ;
- Le rapprochement de deux points de référence (pris sur chacun des solides dans les zones de déformation négligeable) : $\delta = AB - A'B'$.

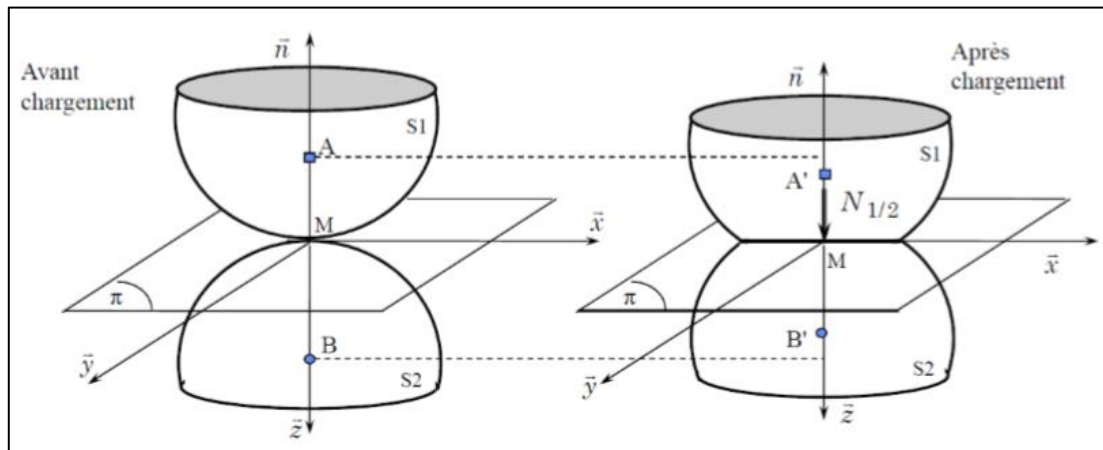


Figure 39- Modélisation des déformations

La nature et les dimensions géométriques du contact sous charge ayant été établi, il est facile de calculer une pression moyenne de contact. Si cette dernière peut paraître suffisante pour une approche des conditions de résistance mécanique elle ne le sera en réalité que si la pression varie peu sur la totalité de la surface de contact, le calcul de résistance de la matière devant être local pour être validé.

Des essais complémentaires permettent de mettre en évidence que la répartition de pression se fait suivant un ellipsoïde (voir Figure 41).

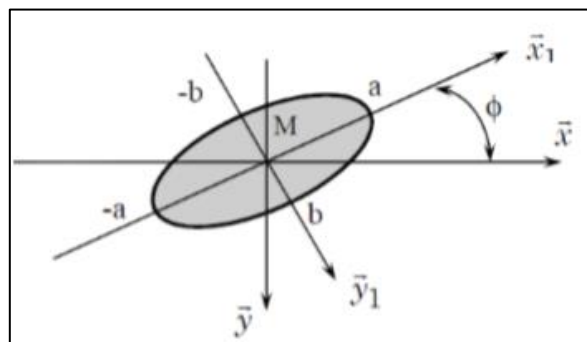


Figure 40- Zone de contact

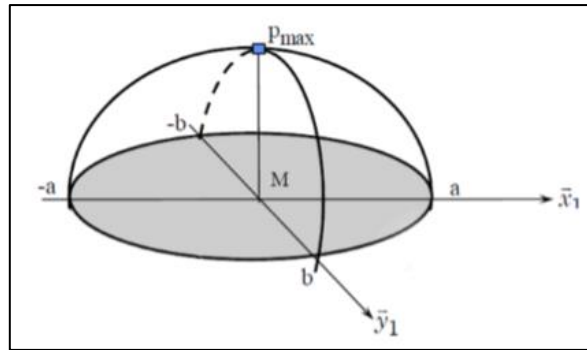


Figure 41- Répartition de pression (ellipsoïde)

On détermine alors la pression de contact moyenne

$$p_{moy} = \frac{N_{1 \rightarrow 2}}{\pi ab} \quad (23)$$

Et la pression maximale

$$p_{max} = \frac{3}{2} p_{moy} = \frac{3N_{1 \rightarrow 2}}{2\pi ab} \quad (24)$$

II.3.2- Taux d'usure [17]

Pour le traitement mécanique de surface par tribofinition et en particulier les centrifugeuses à fond tournant le taux d'usure de l'environnement de travail se calcule par la relation empirique suivante :

$$j_a = C \omega^{b1} \varphi_p^{b2} d^{b3} K_V^{b4} K_W^{b5} G^{b6} HB^{b7} \quad (25)$$

Où :

j_a : Taux d'usure en %/h,

ω : Vitesse de rotation en rad/s,

φ_p : Degré de remplissage de la chambre de travail,

d : Granulométrie de l'environnement de travail en mm,

K_V : Rapport entre le volume des pièces et la charge abrasive,

K_W : Rapport entre le volume du fluide et la charge abrasive,

G : Masse de la pièce à traiter,

HB : Dureté de la pièce,

$C, b1 \dots b7$: Coefficient constant, exposants déterminés expérimentalement.

II.3.3- Volume enlevé [17]

L'enlèvement de matière est considéré comme un processus de glissement d'un matériau solide sur la surface d'un matériau tendre, avec frottement semi-liquide, ce qui signifie frottement des corps en présence d'un liquide qui ne sépare pas complètement les

CHAPITRE II : Frottement et usure

surfaces en contact. Dans ce cas, la formule de calcul du volume de matériau enlevé de la surface molle au cours de l'usure est la suivante :

$$V = k\alpha \frac{LF_n}{\sigma_T} \quad (26)$$

V : Volume de la matière enlevée de la surface molle pendant l'usure,

k : Coefficient d'usure (coefficient d'Archard),

α : Coefficient prenant en compte la présence de contact liquide,

L : Trajectoire de descente,

F_n : Force normale,

σ_T : Limite élastique du matériau.

Conclusion

L'usure est un phénomène qui est due principalement au frottement, ce dernier provoque l'altération dimensionnelle des pièces, augmentation des jeux de fonctionnement, dégradation des caractéristiques superficielles, ce qui nous oblige à changer régulièrement certain pièces dans l'industrie en générale, cependant dans le domaine de la tribofinition, l'usure est utilisé dans le bon sens, elle permet de traiter les pièces et de modifier leurs caractéristiques et d'obtenir des bon états de surfaces et améliore la résistance à l'usure. Nous avons vu dans ce chapitre le mécanisme de frottement, ses contributions adhésive et plastique, ses différents cas ainsi que la mesure de frottement. Nous avons vu également le mécanisme d'usure, l'usure adhésive et abrasive, la mesure de l'usure et finalement l'usure en tribofinition pour le cas des centrifugeuses à fond tournant.

Chapitre III

**Equipements et accessoires de la
tribofinition**

Introduction

La tribofinition est un procédé de traitement mécanique de surface (TMS), dans un milieu actif contrôlé constitué principalement de médias et d'additifs chimiques, le traitement dépend essentiellement des caractéristiques de ces derniers ainsi que de la méthode adéquate choisie pour ce traitement. Il existe plusieurs équipements utilisés dans le domaine de la tribofinition.

Parmi ces équipements, nous avons les vibrateurs, les machines de Smuritropie et les centrifugeuses.

Dans ce chapitre nous allons évoquer les différents équipements ainsi que leurs accessoires (médias et additifs chimiques).

III.1- Equipements de tribofinition

Dans le domaine de la tribofinition, il existe plusieurs équipements, le choix de ses équipements dépend de plusieurs paramètres :

- Dimensions des pièces à traiter,
- Forme géométrique des pièces à traiter,
- Matériaux des pièces à traiter,
- Rugosité demandée,
- Dureté demandé,
- Etc...

III.1.1- Différents types de vibrateurs

Dans le domaine du traitement mécanique de surface, il existe plusieurs types de vibrateurs, chaque un d'eux est destiné pour des pièces bien définies du point de vue matériaux et formes géométriques.

III.1.1.1- Vibrateurs linéaires

Les vibrateurs linéaires sont des machines de finition de surface conçus pour une utilisation particulière. Ils sont principalement adaptés aux traitements des pièces lourdes et de grandes dimensions.

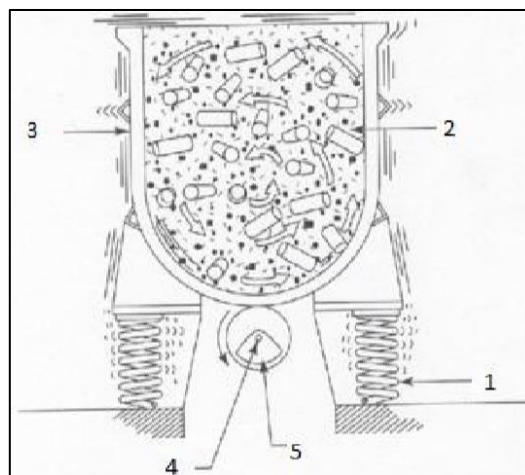


Figure 42- Vibrateur linéaire [1]

CHAPITRE III : Equipements et accessoires de la tribofinition

Avec :

1- Ressorts, 2- Medias et additifs chimiques, 3- Chambre de travail, 4- Moteur, 5- Balourd.

Eléments du vibreur linéaire

Les vibreurs linéaires sont constitués de 4 éléments essentiels qui sont :

1- Chambre de travail

La chambre de travail est l'endroit où l'opération s'effectue (3 sur la figure 42), elle est généralement en forme U. Elle est composée de cloisons séparatrices, Système de distribution des lubrifiants (eau + additifs), des plots amortisseurs pour éviter la transmission des vibrations aux autres éléments, porte de vidage des abrasifs et une bande en polyuréthane sur les parois qui sert à éviter d'abimer les pièces traitées

2- Moteur

Les vibreurs linéaires sont équipés de différents types de moteurs à balourd (4 et 5 sur la figure III.1) pour générer des vibrations, ces moteurs sont positionnés horizontalement.

3- Bâti de la machine

Tous les bâtis des machines sont en construction mécano-soudés parfaitement rigide. Le concept des ressorts spéciaux hélicoïdaux permet à la cuve de traitement d'être parfaitement isolée du bâti de la machine.

4- Armoire Electrique

L'armoire électrique est composée de :

- Bouton pour allumer et éteindre la machine
- Réglage de la variation de vitesse du moteur
- Réglage de la variation de fréquence
- Réglage des masselottes

Principe de fonctionnement

Pour les vibreurs linéaires, les pièces à traiter sont chargées dans la chambre de travail avec les médias et les additifs chimiques. Un moteur balourdé en position horizontale génère des vibrations transféré vers cette chambre ce qui agite les médias et les pièces à traiter dans le sens de rotation du moteur.

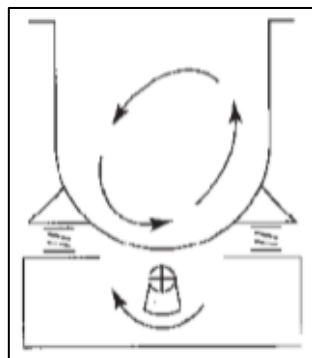


Figure 43- Principe de fonctionnement d'un vibreur linéaire [1]

CHAPITRE III : Equipements et accessoires de la tribofinition

Domaine d'application

Les vibrateurs linéaires sont principalement adaptés pour tous les types de traitement de Tribofinition, tels que l'ébavurage, décapage, rayonnage, polissage et brillantage à la bille de pièces moulées et forgées. Ils permettent le traitement de pièces individuelles séparées par des cloisons amovibles ou le traitement de plusieurs pièces fixées sur des montages. Il y a également une possibilité d'effectuer un traitement pièces contre pièces sans médias, ou pièces contre pièces avec medias, ou pièces contre pièces avec medias et additifs chimiques. [37]



Figure 44- Vibreur linéaire [37]

Types des vibrateurs linéaires

Il existe plusieurs types de vibreur linéaire qui se différencient au niveau de leur motorisation. Parmi ces types on cite :

Les vibrateurs linéaires de type TE, ont un moteur à entraînement direct qui est fixé sous la cuve de traitement.

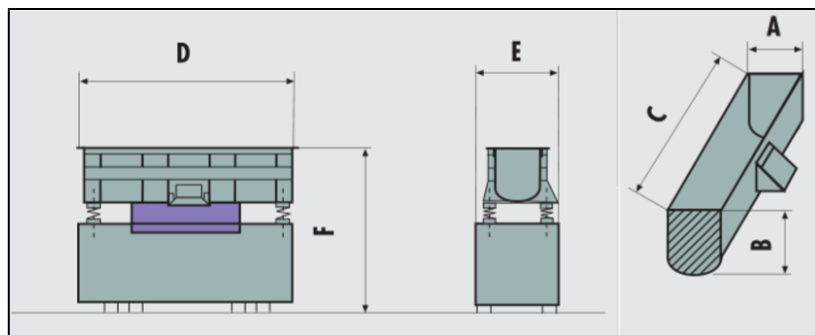


Figure 45- Vibreur linéaire de type TE [37]

Les vibrateurs linéaires de type TS, deux groupes balourdés sont montés sur les flancs latéraux (gauche et droite) de la cuve de traitement.

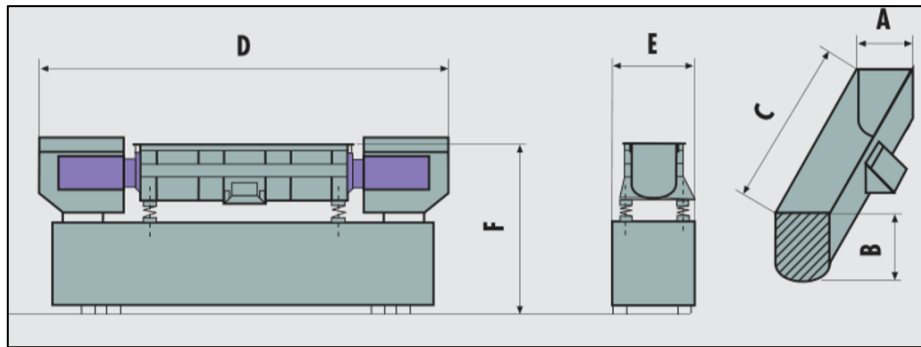


Figure 46- Vibrateur linéaire de type TS [37]

III.1.1.2- Vibrateurs circulaires

Les vibrateurs circulaires sont des équipements industriels utilisés pour plusieurs opérations de tribofinition à titre d'exemple l'ébavurage, polissage et autres.

Eléments du vibrateur circulaire

Les différents éléments d'un vibrateur circulaire sont montrés sur la figure 47

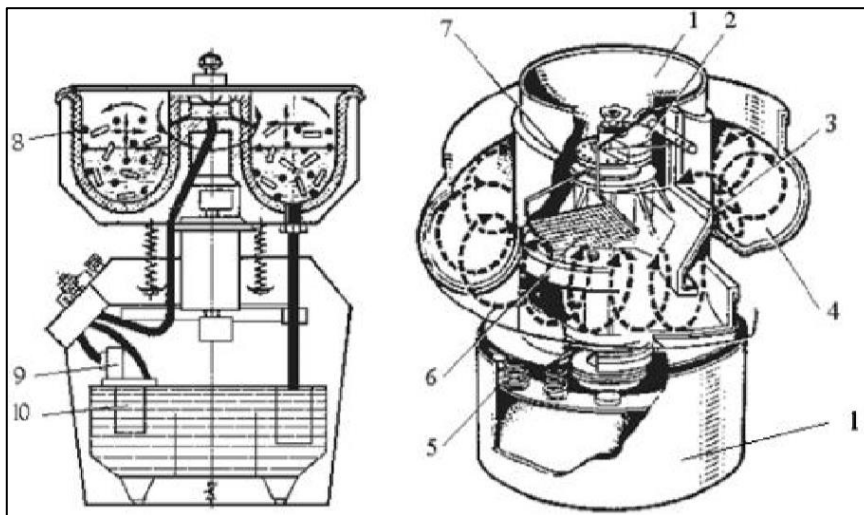


Figure 47- Schéma descriptif d'un vibrateur circulaire [1]

Avec : 1 : Suspension de la cuve de traitement, 2 : Vibrateur (les balourds), 3 : Porte de vidage des abrasifs, 4 : Cuve de traitement, 5 : Amortisseur, 6 : Tamis de séparation intégré, 7 : Moteur, 8 : Revêtement, 9 : Pompe, 10 : Porte de vidage.

1- Chambre de travail

La chambre de travail est sous forme circulaire avec un fond plat pour une meilleure immersion de la charge abrasive. Une pompe est installée afin d'arroser les éléments en contact (pièces medias) avec de l'eau et d'additif chimique. La chambre de travail est recouverte d'un revêtement en polyuréthane pour une raison d'éviter la détérioration des pièces traitées.

CHAPITRE III : Equipements et accessoires de la tribofinition

2- Séparateur

Le vibreur circulaire est équipé d'un tamis de séparation pour lequel les médias et les pièces sont acheminés vers lui. Les médias tombent à travers le tamis puis sont réacheminés dans la cuve de travail alors que les pièces sont dirigées vers la sortie.

3- Moteur

Contrairement aux vibreurs linéaires, les vibreurs circulaires sont équipés d'une motorisation positionnée verticalement

4- Armoire électrique

Une armoire électrique est installée dans le but contrôler les paramètres et le fonctionnement de la machine (mise en marche et arrêt, variation de la vitesse de rotation et de la fréquence).

Principe de fonctionnement

La Tribofinition s'effectue dans une cuve de traitement montée sur ressorts hélicoïdaux. Un moto-vibreur spécial monté au centre de la cuve fournit l'énergie nécessaire à la vibration. Les pièces et médias (abrasifs), auxquels sont ajoutés l'eau et un additif chimique (savon), sont brassés dans la cuve. Les vibreurs circulaires sont souvent équipés de tamis de séparation et de trappe pneumatique pour assurer la séparation des pièces et médias. Tandis que les pièces sont transférées via le tamis de séparation à l'extérieur du vibreur pour être ensuite, par exemple, séchées dans un sécheur circulaire, les médias restants retournent dans la cuve de traitement.

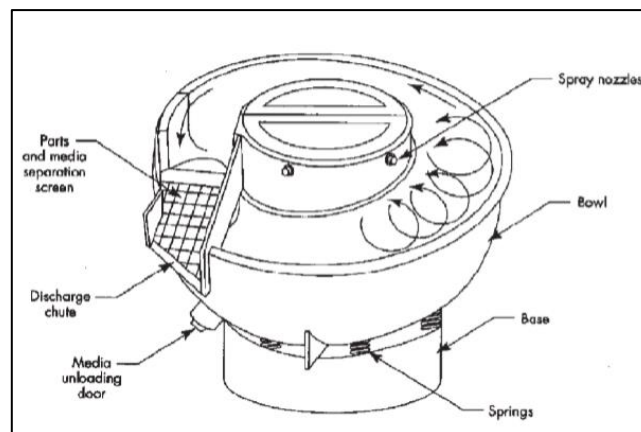


Figure 48- Principe de fonctionnement d'un vibreur linéaire [1]

Domaine d'application

Les vibreurs circulaires sont extrêmement flexibles et évolutifs et permettent plusieurs types de traitement en Tribofinition : ébavurage, ébarbage, rayonnage, nettoyage, décalaminage et polissage de pièces provenant d'emboutissage, fonderie, formage, forge, usinage. Plusieurs matières peuvent être traitées : métal, plastique, céramique, caoutchouc, bois, pierre et verre. D'excellents résultats peuvent être obtenus, tant sur les petites pièces que sur celles plus grandes et plus lourdes.



Figure 49- Vibrateur circulaire [35]

Types de vibrateurs circulaires

Il y a plusieurs types de vibrateurs circulaires qui diffèrent par la forme et la dimension de la cuve ou par leurs caractéristiques, parmi ces types on cite.

Les vibrateurs circulaires «EC » qui sont les plus proposés grâce à la conception spéciale de la cuve de travail qui a un fond incliné qui permet le traitement et la séparation des petites et grandes pièces. Ils sont idéalement adaptés pour la finition de pièces fragiles.

Les vibrateurs circulaires « Euro » qui sont idéals pour les traitements de finition automatiques et ils sont caractérisés par une cuve torique spiralée avec une trappe de séparation automatique intégrée.

Les vibrateurs circulaires « A » qui ont été spécialement conçus pour le traitement de pièces pouvant être séparées magnétiquement grâce à un séparateur magnétique et une cuve de travail, renforcée et spéciale.

Les vibrateurs circulaires à grand rayon ont la possibilité d'être utilisés dans un système de production en continu ou par charge. Leur degré de flexibilité élevé offre des avantages significatifs pour une planification de production, favorisant la réduction des temps de traitement avec un coût plus économique, par ailleurs, ils nécessitent un faible encombrement au sol. [29]



Figure 50-Vibrateur circulaire à grand rayon [37]

III.1.2- Machines à multibroches (type Smuritropie)

Les machines à broches (multi broches / mono broche) peuvent être utilisées pour la finition de pièces fragiles de valeur et qui ne doivent pas s'entrechoquer durant le traitement. Exemples de pièces :

- Disques de turbines
- Aubes
- Implants médicaux
- Poignées de portes de valeur

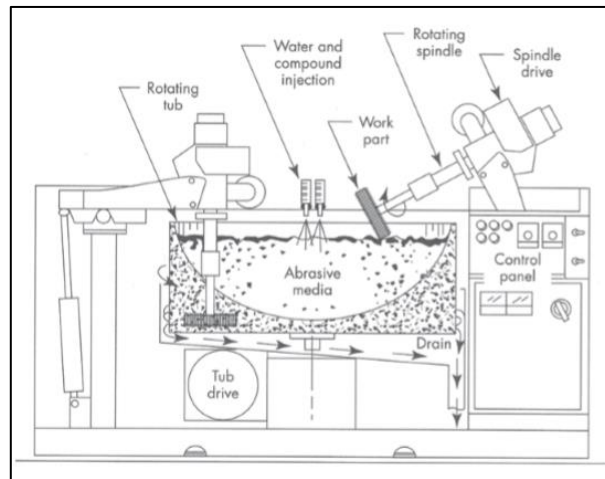


Figure 51-Machines à broches [1]

Principe de fonctionnement

Dans les machines à broche (figure 52), les pièces sont fixées à une broche circulaire tournant à grande vitesse puis immergées dans la cuve de travail chargée de média de polissage. La broche n'est pas limitée à une action rotative. En complément, une oscillation verticale et un mouvement épicycloïdal peuvent être utilisés pour renforcer l'action de polissage.



Figure 52- fonctionnement d'une machines à broche [37]

III.1.3- Machines à force centrifuges

III.1.3.1- Tonneaux centrifuges

Le tonneau rotatif conventionnel est la technique la plus ancienne de la tribofinition. Elle a été utilisée par les anciennes civilisations chinoises et égyptiennes, ils utilisaient des pierres naturelles comme médias à l'intérieur des barils en rotations pour la finition des surfaces de leurs armes et bijoux. Aujourd'hui, le tonneau rotatif est un processus qui est considérablement développé par rapport aux opérations de rotations anciennes. Le développeur moderne de ce procédé est l'Anglais Edmunds en 1885.

La finition en tonneau est un moyen polyvalent de traitement des surfaces, les coûts d'équipement sont généralement faibles, le fonctionnement est simple et il existe encore des applications où il s'agit du procédé le plus économique. [26]

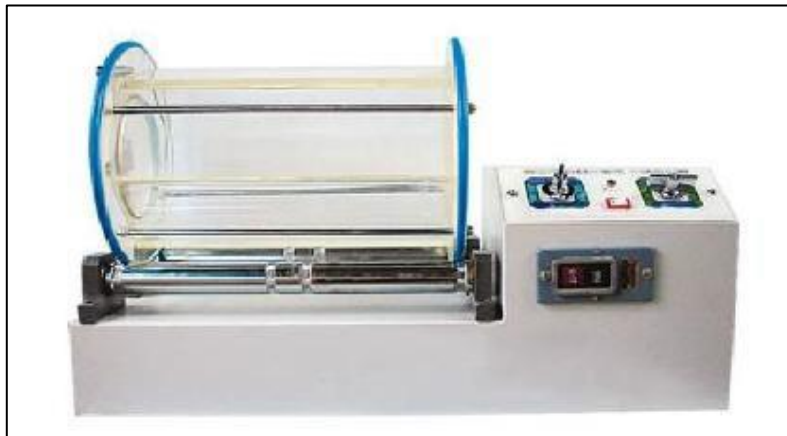


Figure 53- Tonneau centrifuge [35]

Principe de fonctionnement

Les tonneaux rotatifs de tribofinition sont des équipements à mouvement rotatif et non vibrant.

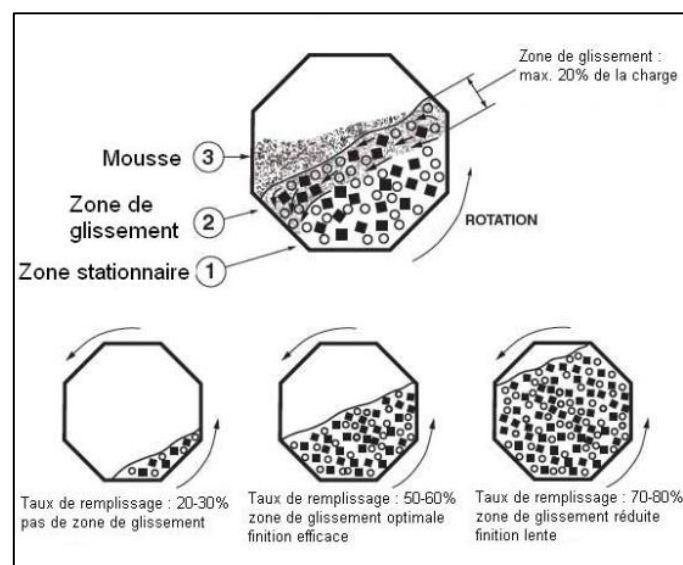


Figure 54- Fonctionnement d'un tonneau centrifuge [35]

CHAPITRE III : Equipements et accessoires de la tribofinition

La couche supérieure de la charge de travail glisse. Lorsque le tonneau tourne, la charge monte dans le baril jusqu'à un point de rotation. La force de gravité surmonte la tendance de la masse à coller, puis la couche supérieure glisse vers le bas du tonneau. Le tonneau est normalement chargé à environ 60% de sa capacité avec un mélange de pièces à traiter, des médias, d'eau et des additifs chimiques. Des niveaux de charge plus élevés (jusqu'à 80%) sont souhaitables pour certaines pièces, telles que les composants volumineux ou lourds.

Augmenter le niveau de charge au-dessus de 60% diminue la longueur de la glissière, réduisant ainsi la probabilité que les pièces se touchent. Tandis qu'une charge plus élevée réduit la force de contact de la pièce, les cycles sont beaucoup plus longs. Bien qu'une action abrasive puisse se produire lorsque la charge de travail augmente dans le baril, environ 90% de l'action de frottement se produit pendant la glissière. [1]

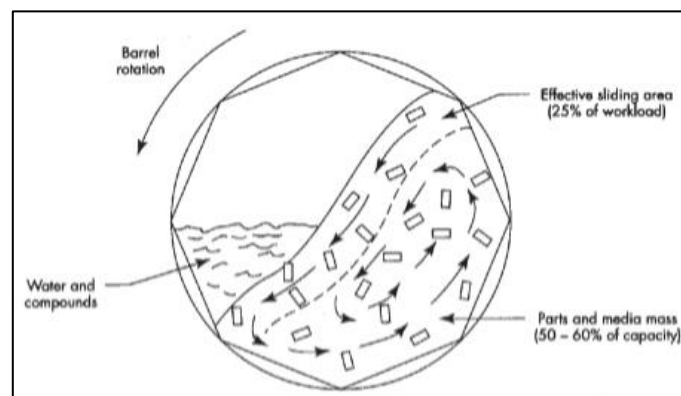


Figure 55- Coupe transversale du tonneau montrant le flux des pièces et des médias [1]

Domaine d'application

Les tonneaux rotatifs de tribofinition permettent de réaliser des opérations de polissage et d'ébavurage. Ils permettent d'obtenir de très bons états de surface du fait d'un mouvement de glissement entre les pièces, les médias et les additifs chimiques (phénomène de vague).

L'inconvénient de ces équipements tient à l'importance des temps de cycle. Leur ergonomie peut-être assez intéressante car elle permet de transférer directement la charge (pièces + médias) dans un tamiseur de séparation. [35]

1.3.2 Centrifugeuses satellitaires

La finition centrifugeuses satellitaires comme d'autres procédés de tribofinition, utilise des média, des additifs et de l'eau pour ébavurer et finir les pièces à traiter. La différence entre ce processus et d'autres est que l'action centrifuge permet un fonctionnement très rapide et très contrôlable. Le processus, maintient un frottement doux avec un impact minime ou nul de la pièce, permettant de produire des finitions fines sur des pièces de précision et fragiles. Un autre avantage important est sa capacité à transmettre des contraintes de compression élevées sur les surfaces des pièces.

Grâce à ces mouvements très complexes et à de hautes vitesses de rotation, les temps de cycle de polissage peuvent être réduits de manière sensible, mais l'intérêt le plus important tient à la possibilité d'utiliser des médias de taille très réduite pour accéder à des zones des pièces très difficiles d'accès (micromécanique, horlogerie, microélectronique...). [1]



Figure 56- centrifugeuse satellitaire [35]

Principe de fonctionnement

Sur ces machines, plusieurs tambours sont montés à la périphérie d'une tourelle (Voir figure 57). La tourelle tourne dans un sens, tandis que les tambours tournent à une vitesse plus lente dans le sens opposé. Les machines sont disponibles avec tourelle et tambours tournant dans un plan horizontal ou dans un plan vertical. La rotation dans un plan horizontal est fréquemment utilisée lorsque les tambours (conteneurs de travail) sont retirés de la machine pour être rechargés. Environ 60 à 80% de la capacité de chaque tambour est remplie d'un mélange de pièces à traiter, des médias, d'additifs et de l'eau.

Les satellites sont de forme cylindrique ou prismatique droit à base hexagonale, ils sont soumis à un mouvement épicycloïdal (dans un plan horizontal, vertical ou oblique). Afin d'équilibrer l'équipement, 2 ou 4 satellites sont utilisés. Dans certains cas, les axes des satellites peuvent être inclinés, ce qui permet de générer des mouvements plus complexes et par conséquent d'atteindre des zones plus difficiles d'accès.

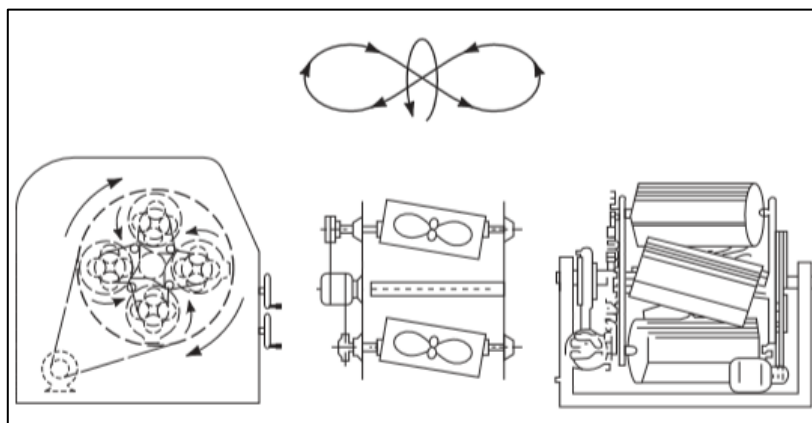


Figure 57- Fonctionnement d'une centrifugeuse satellitaire [1]

CHAPITRE III : Equipements et accessoires de la tribofinition

Domaine d'application

Le principal avantage des centrifugeuses satellitaires est la très importante énergie qu'elles procurent aux médias ce qui permet :

- de réduire de manière très sensible les durées des opérations d'ébavurage pour des composants en matériaux durs ou pour des enlèvements de matière importants.
- d'utiliser des médias de taille très réduite, extrêmement difficile à utiliser dans des vibrateurs (la faible énergie des vibrateurs ne permet pas de compenser l'inertie réduite des médias liée à leur masse et la mise en mouvement ne se fait pas de manière correcte)

Type des centrifugeuses satellitaires

Il en existe deux types de centrifugeuses qui sont :

La centrifugeuse satellitaire à axe oblique qui fonctionne selon le principe satellitaire générant un mouvement de rotation autour d'un axe horizontal composé également avec un mouvement latéral.



Figure 58- centrifugeuse satellitaire à axe oblique [35]

La centrifugeuse satellitaire à axe horizontal qui fonctionne selon le principe satellitaire générant un mouvement de rotation autour d'un axe horizontal.

1.3.3 Centrifugeuses magnétique

Les centrifugeuses magnétiques sont constituées d'un bâti à l'intérieur duquel un plateau magnétique horizontal est mis en rotation. Les médias ou porteurs sont magnétiques (acier, inox magnétique ou encore céramique chargée), ces derniers sont ainsi mis en rotation alors que les pièces, non magnétiques ont tendance à moins se déplacer.

Des opérations d'ébavurage ou de polissage peuvent ainsi être réalisées avec des résultats très différents de ce que l'on obtient avec les autres familles d'équipements liées à la tribofinition.

CHAPITRE III : Equipements et accessoires de la tribofinition

Des mouvements complexes peuvent être créés en paramétrant les déplacements relatifs des masses magnétiques (composition de mouvements). [35]



Figure 59- Centrifugeuse magnétique [35]

1.3.4- Centrifugeuse à fond tournant

Le processus de finition par machine centrifugeuse à fond tournant est la plus récente des méthodes de tribofinition à haute énergie.

La machine centrifugeuse à fond tournant, aurait été inventée par « Yoshita » au Japon et développée commercialement par « Roto-Finish » en Allemagne (Choi 1998). Il a été introduit en Angleterre en 1969 (Coffield 1981).



Figure 60- centrifugeuse à fond tournant [35]

CHAPITRE III : Equipements et accessoires de la tribofinition

Eléments d'une centrifugeuse à fond tournant

Ces machines sont constituées d'un bol à toit ouvert à parois latérales fixes et d'un disque rotatif pour socle (Voir les figures 61). Des médias, des additifs et des pièces à usiner sont contenus dans le bol.

Les éléments essentiels qui constitue une centrifugeuse a font tournant sont :

La centrifugeuse à fond tournant est principalement composé d'un moteur, d'une cuve de traitement avec revêtement polyuréthane.

La chambre du travail qui est sous forme d'un tube cylindrique, qui constitue les parois latérales fixes.

Le fond ou plateau qui est sous forme d'un disque. Il est relié à un moteur ce qui lui donne un mouvement rotatif, un interstice nommé joint, sépare ces deux parties. Ce dernier doit être réglé de manière rigoureuse, enfin, il faut absolument éviter d'utiliser des pièces ou des abrasifs dont la taille approche celle du joint.

Le moteur qui fournit l'énergie nécessaire au disque tournant pour le faire tourner en supportant les charges des médias et des pièces à traiter.

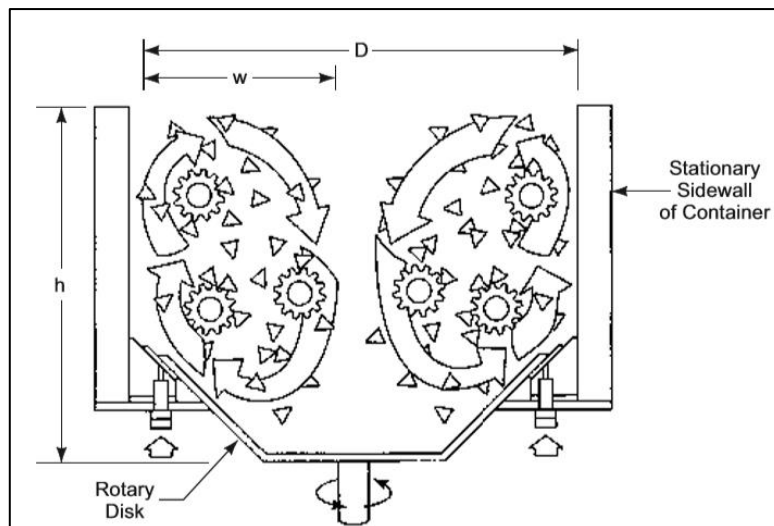


Figure 61-Principe de la machine centrifugeuse à fond tournant [1]

Principe de fonctionnement

Pendant le traitement, les pièces subissent un mouvement de type toroïdal, du fait du mouvement du plateau. Les médias et les pièces à traiter suivent le mouvement du plateau pour se mettre en contact.



Figure 62-Centrifugeuse à fond tournant lors du traitement

Domaine d'application

Alors que la centrifugeuse à fond tournant était initialement pensée pour être utile uniquement pour l'enlèvement rapide de la matière, il est actuellement utilisé pour des applications telles que l'amélioration des finitions des aubes de turbine avec des hautes précisions en quelques minutes seulement, et pour polir les montures de lunettes en plastique en 3 heures par rapport aux 48 heures nécessaires aux vibrateurs.

L'un des avantages remarquables de cet équipement, que l'énergie générée par ce type d'équipement est environ 5 fois plus importante que dans un vibreur. Cela permet de réduire les cycles de traitement des traitements, des heures en quelques minutes.

III.2- Médias

Le terme «média» désigne les éléments abrasifs ou non abrasifs utilisés dans les processus de tribofinition. La fonction principale des médias est d'abraser ou de brunir les surfaces des pièces pour obtenir la finition souhaitée, ils permettent de réaliser des opérations d'ébavurage ou de polissage et d'apporter un traitement à la fois uniforme et constant. Ils peuvent aussi rendre des surfaces lisses et brillantes.

Il en existe plusieurs types, ils diffèrent par leurs compositions, leurs degrés d'abrasion, leurs formes et leurs dimensions, qui peuvent être choisis en fonction du travail à effectuer et du résultat souhaité.

III.2.1- Types des médias

Les principaux types de médias de tribofinition, comprennent les abrasifs naturels, les produits agricoles, les médias aléatoires synthétiques, les médias en céramique préformés et les matériaux à base de résine et les médias métalliques.

- **Médias naturels**

Les pierres concassées, écrasées et classées étaient les premiers médias de tribofinition, Ils ont cependant été largement remplacés par des matériaux synthétiques principalement parce que les pierres naturelles sont plus douces, user plus rapidement, Sont moins cohérent, et ne se produisent que dans des formes aléatoires. Les médias naturels aléatoires (Figure 63),

CHAPITRE III : Equipements et accessoires de la tribofinition

comprennent des pierres naturelles de plusieurs types populaires, y compris le granit, le calcaire, le silex, l'émeri, et d'autres. Ce sont des médias à faible coût, mais en général, ils ne sont pas rentables pour la plupart des pièces débordées.



Figure 63- Médias naturels

- **Médias aléatoires synthétiques**

Comme les médias de carbure de silicium fondu (SiC) ou bien L'oxyde d'aluminium fondu (A1203), écrasé et gradué, a des propriétés d'abrasion plus importantes que certains matériaux naturels. D'autres avantages incluent une bonne résistance à l'usure et une uniformité de taille et de qualité.

- **Médias préformés**

Le développement de la forme, de la taille et des caractéristiques d'abrasion et de finition des médias contrôlés a été largement responsable de mettre la tribofinition un processus de précision. Les médias préformés (figure III.64, 65 et 66), sont disponibles en :

- **céramique**

Les médias en céramique sont fabriqués en partant d'un mélange de la porcelaine, de l'argile kaolin, de l'argile de rivière ou d'autres matières vitreuses avec des pourcentages variables d'abrasifs ou sans aucun abrasif. Ces médias sont disponibles dans une large gamme de formes et de tailles et dans un grand nombre de qualités assez standard, les qualités de coupe extra rapide, coupe rapide, moyenne et lente à nulle sont typiques.



Figure 64- Médias en céramique [36]

- **Plastique**

Dans les médias plastiques nous avons du polyester qui fait la liaison avec l'abrasif. Ils sont caractérisés par une faible densité, ce qui minimise le poids dans la chambre du travail,

CHAPITRE III : Equipements et accessoires de la tribofinition

cela en fait un bon choix pour les métaux tendres et les finitions élevées, car les dommages sont généralement moins importants.



Figure 65- Médias en plastique [36]

➤ Porcelaine

Les médias en porcelaine sont destinés à des opérations de polissage. Ils sont beaucoup plus durs que les céramiques conventionnelles utilisées pour l'égavurage, leur durée de vie est également beaucoup plus longue. Ces médias de tribofinition en porcelaine peuvent être produits dans des dimensions très particulières.



Figure 66- Médias en porcelaine [36]

• Médias métalliques

Les média métalliques se présente sous des formes préformées dures ou molles, ils sont en acier trempé préformé (figure 67), Sans abrasif, sont disponible dans une variété de formes et de tailles. Ils ont utilisé principalement pour le polissage pour obtenir un lustre maximal à des fins décoratives, pour les applications d'égavurage léger et pour le nettoyage lourd. Les avantages incluent l'uniformité de la forme et de la taille.






Figure 67- Médias métalliques [36]

III.2.2- Formes des médias

Différentes formes des médias présentent des avantages pour des applications précises, dépendant principalement des configurations des pièces à usiner.

La table 4 montre l'utilité de quelques formes des médias de tribofinition.

Forme	Utilité	Présentation
Triangulaire	Les médias de forme triangulaire permettent une action uniforme et sont efficaces pour atteindre les coins, les fentes, les trous ou ouvertures.	
Cylindrique	Avec ses extrémités coupées à des angles de 22 à 60 °, les médias cylindriques atteignent plus facilement les renforcements et conviennent parfaitement à l'ébavurage de trous et des contours.	
Diamant	Les médias en forme de diamant possèdent des pointes acérées pouvant pénétrer dans les coins, les fentes et les renforcements sans problèmes de logement.	

CHAPITRE III : Equipements et accessoires de la tribofinition



Conique	Le média de forme conique est très polyvalent. Il permet de pénétrer partiellement dans des trous de différents diamètres sans problèmes de logement.	
Sphérique	Les médias de forme sphérique ont un bon écoulement et un bon contact avec la surface. Il est utile lisser uniformément les surfaces.	

Tableau 4-Utilité des formes des médias utilisés en tribofinition

Il existe d'autres formes plus particulières qui ne sont pas décrites dans le tableau 4 et qui sont montrés sur la figure qui suit.

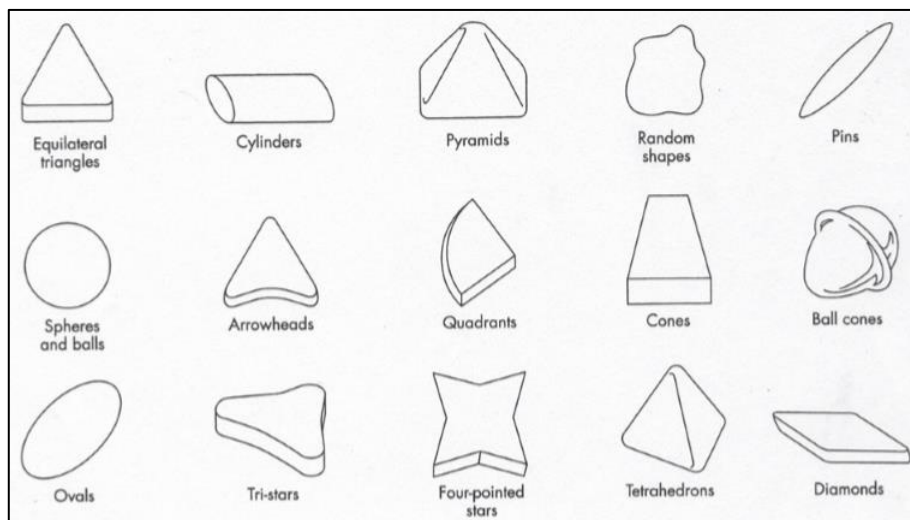


Figure 68- Formes des médias utilisés pour tribofinition [1]

III.2.3- Sélection des médias

La sélection des médias appropriés pour une application spécifique est essentielle pour des résultats optimaux d'ébavurage et de finition de surface, Les principaux facteurs de sélection sont [1] :

- **Composition des médias**

La composition d'un média détermine s'il s'agit d'un type de média de coupe ou de finition. Les types de médias de coupe contiennent des abrasifs, et les types de finition n'ont pas d'abrasifs ou seulement des abrasifs très fins. Les médias avec des capacités de coupe agressives est généralement le meilleur pour le retrait des grandes bavures. Les exigences pour les finitions de surface lisses nécessitent l'utilisation des médias de coupe plus lents avec des abrasifs fins ou sans abrasion. Les médias plus durs peuvent généralement être utilisés dans les méthodes à haute énergie de tribofinition. La composition d'un média détermine également son poids, ce qui affecte le taux de travail effectué. Les médias plus lourds exercent une pression accrue sur les pièces que les médias plus légers.

CHAPITRE III : Equipements et accessoires de la tribofinition

• Forme des médias

Les principales considérations lors du choix d'une forme sont les suivantes :

- 1) donner accès à toutes les surfaces nécessitant l'ébavurage ou la finition ;
- 2) ne pas loger dans des trous ou des recoins ;
- 3) permettent une séparation facile des pièces à la fin du cycle.

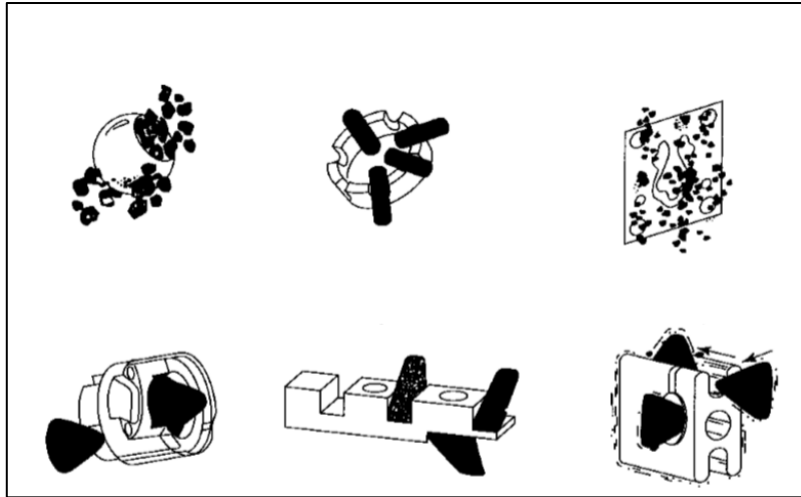


Figure 69- Exemples de médias adaptés aux caractéristiques de la pièce

• Taille du média

La taille des médias utilisés est importante pour plusieurs raisons. Une fonction de taille est d'aider à garder les pièces séparées pendant la finition. Les petits médias permettent de séparer les petites pièces. D'autre part, les médias importants coupent plus rapidement et produisent une finition plus rugueuse que les petits médias. Par conséquent, un mélange de tailles de médias est souvent utilisé pour traiter des pièces.

• Poids des médias

Un média lourd exerce plus de pression sur la partie qu'un média léger. Ce poids permet une coupe plus rapide, mais il provoque également une déformation des parties minces ou ductiles. Les médias lourds plus lisses fournissent un meilleur polissage que les médias légers.

III.3- Additifs chimiques

Ce sont des produits chimiques qui se présentent sous trois formes, liquide, poudre et pâte. Ils sont utilisés dans le but d'améliorer la dureté et l'état de surface des pièces traitées et même à nettoyer, modifier la brillance ou la couleur des pièces selon le besoin industriel. Pour le cas de la tribofinition il procure à la surface des pièces traitées les propriétés mécano-chimiques nécessaire selon le type de l'additif choisi en tenant comptes des paramètres suivants :

- La qualité de surface souhaitée,
- Le traitement de surface effectué,
- Le matériau traité,
- La température dans la chambre de travail,
- La forme d'abrasif utilisé,
- Le taux de pollution chimique de l'additif.

III.3.1- Additifs liquides

Les additifs liquides sont utilisés dans la chambre du travail du vibreur d'une façon diluée. Indépendamment de leurs caractéristiques propres, ils permettent dans une utilisation en machine d'améliorer le travail de la finition mécanique. Ils permettent de garder les propriétés des abrasifs sans les endommagés et il garde aussi les pièces propres ainsi le traitement de finition surfacique sera satisfaisant. [21]

C'est le type le moins polluant et le plus économique ce qui fait de lui le plus utilisé, il permet :

- de refroidir les pièces traitées,
- garder la surface des échantillons propres,
- nettoyer les surfaces et les protéger contre la saleté,
- protection contre la corrosion,
- le dérouillage des ferreux et le décapage, brillantage des alliages cuivreux.



Figure 70- Additifs liquides [36]

Il existe trois types de fluides.

- **L'activateur chimique dans un milieu acide** est destiné au nettoyage des pièces en acier, à la destruction et l'enlèvement de la bavure et à l'intensification du processus de traitement.
- **L'activateur chimique dans un milieu alcalin (basique)** est destiné à l'enlèvement de la bavure, et au polissage.
- **L'activateur chimique dans un milieu neutre** est destiné au nettoyage, au lavage et à l'enlèvement des produits d'usure.

Dans le tableau ci-après on introduit la composition de l'additif chimique liquide recommandé pour différentes opérations :

CHAPITRE III : Equipements et accessoires de la tribofinition

N°	Composition des additifs chimiques	Symbole	Concentration	Domaine d'exploitation
1	Silicate de sodium	[Na ₂ SiO ₃]	20 - 30	Protéger les pièces de la corrosion, conservation de courte durée.
2	Hydroxyde de Sodium	[NaOH]	20	Protéger les pièces de la corrosion, conservation de courte durée
3	Carbonate de soude	[Na ₂ CO ₃]	20	Protéger les pièces de la corrosion, conservation de courte durée.
4	Nitrate de sodium	[NaNO ₃]	20 - 30	Nettoyage, décalaminage.
5	Hydrate d'oxyde de sodium	[Na ₂ O, H ₂ O]	15	Nettoyage des surfaces épaisses de la calamine.
6	Phosphate de Sodium	[Na ₂ PO ₄]	20 - 30	Nettoyage des surfaces épaisses de la calamine.
7	Soude à l'ammoniac	[NH ₃ , NaOH]	20 - 30	Nettoyage des surfaces épaisses de la calamine.
8	Perchlorure de fer	[FeCl ₃]	2 - 10	Assure une couleur éclatante pour l'état de surface
9	Polyacrylamides	$\left[\begin{array}{c} -\text{CH}_2 - \text{CH} - \\ \\ \text{CONH}_2 \end{array} \right]_n$	10	Assure la brillance du métal.

Tableau 5- Les différents additifs chimiques liquides [21]

III.3.2- Additifs en poudre

Sous forme de poudre les additifs ont un rôle secondaire, on les utilise lorsque d'autres produits ne suffisent pas pour certaines opérations :

- dégraissage massif,
- procédés spéciaux de décapage et de décalaminage,
- augmentation du pouvoir abrasif,
- nettoyage des abrasifs.

Il existe aussi des poudres très fines dont la taille est de l'ordre de la dizaine de nanomètres.

Ces poudres permettent d'obtenir des résultats particulièrement intéressants lorsque l'on recherche un état de surface de très haute qualité. Quelques exemples de ce type d'additifs sont présents dans le tableau suivant.



Figure 71- Additifs en poudre [36]

CHAPITRE III : Equipements et accessoires de la tribofinition

N°	Composition des additifs chimiques	Domaine d'exploitation
1	poudre d'oxyde d'Aluminium	Bien adaptée pour des travaux d'ébavurage doux, mais également pour des travaux de préparation au polissage
2	poudre d'oxyde d'Aluminium	Destinée à des travaux de polissage fin. Nécessite une première étape de préparation au polissage avec une poudre de type poudre d'oxyde d'Aluminium ou équivalent
3	poudre de carbure de silicium purifiée	Bien adaptée pour des travaux d'ébavurage puissant. Elle peut avoir pour inconvénient de ternir les surfaces (inox par exemple) et nécessiter un ébavurage complémentaire à la poudre d'oxyde d'Aluminium avant de passer au polissage

Tableau 6- Les différents additifs chimiques en poudre [21]

III.3.2- Additifs en pâte

Les pâtes sont utilisées avec des médias en vibrateurs circulaires et machines à force centrifuge pour obtenir un état de surface lisse et très brillant (finition des surfaces sensibles). Avec la pâte et les médias, et adapté à tous les problèmes spécifiques car elle peut être utilisée comme pâte de polissage ou d'ébavurage.

Cette même pâte s'accorde à la structure des surfaces et les affine de façon économique en respectant l'environnement.

Les produits en poudre sont l'évolution logique de nos pâtes déjà éprouvées.

Et on en trouve plusieurs types qui se différencient avec le type de matériaux utilisés (Acier, Cuivre, Aluminium, Zinc.....) et le travail à faire (Ébarbage, Ébavurage, Rayonnage, Superfinition, Brillantage, Polissage.....).

Et parmi les différents types de pâte on trouve :

- pâte de polissage,
- pâte d'ébavurage universelle,
- pâte à effet légèrement abrasif,
- pâte de polissage avec brillantage,
- pâte de brillantage pour la finition de pièces pré-polies,
- pâte légèrement abrasive ayant une bonne action de brillantage et de polissage,
- pâte de polissage avec bonne capacité de brillantage,
- produit spécial pour métaux non ferreux et précieux,
- pâte d'ébavurage très et extrêmement mordante.



Figure 72- Additifs en pâte [21]

Conclusion

En traitements mécanique de surface et particulièrement en tribofinition, le choix de l'équipement et des accessoires de traitement est très important car le résultat final du procédé dépend des ingrédients utilisés c'est-à-dire de ces derniers (équipement, médias et additifs).

Nous avons vu dans ce chapitre les différents types équipements, les vibrateurs linéaires, circulaire, les machines à broche, les tonneaux centrifuges, les centrifugeuses satellitaires, magnétiques et les centrifugeuses à fond tournant ainsi que leurs domaines d'application, avantages et inconvénients de chaque équipement. Nous avons vu également les médias et leurs différents types, formes, taille et matériaux, ainsi que leurs sélections et finalement les additifs chimiques utilisé pour la tribofinition les additifs liquides, additifs en poudre et les additifs en pâte.

Chapitre IV

Conception de la centrifugeuse à fond tournant

Introduction

Ce chapitre porte sur la conception de la machine centrifugeuse à fond tournant sous le logiciel SOLIDWORKS 2016.

Tout d'abord le travail a été débuté par la définition d'un cahier des charges tout en effectuant une analyse des besoins et une liste des contraintes, par la suite, nous avons fait une conception des éléments constituant la machine en s'inspirant des modèles déjà existants, par des dessins de définition et des dessins d'assemblage (voir l'annexe) sans oublier d'apporter un schéma cinématique en respectant le cahier des charges, avec justification des choix de formes, tailles et matériaux de ces derniers.

Suivi par le calcul analytique des systèmes de fixation (vis et boulons), calcul d'ajustements et simulation numérique de la structure dans le but de vérifier la résistance des éléments de la machine aux charges appliquées.

IV.1- Définition du cahier des charges

La conception d'une machine se fait en respectant un cahier des charges, définit d'une manière pour répondre aux besoins de la clientèle et aux conditions de fonctionnement.

IV.1.1- Analyse du besoin

La machine centrifugeuse réalisée doit principalement accomplir les fonctions suivantes :

- Assurer le traitement de surface des pièces dans une chambre de travail en utilisant la force centrifuge,
- Facilité de vider les médias de la chambre de travail après chaque utilisation,
- Supporter le poids des médias et des pièces à traiter,
- Eliminer le maximum des vibrations et du bruit,
- Possibilité de varier la vitesse de rotation,
- Stabilité de la machine lors du fonctionnement,
- Possibilité de l'amélioration continue de cette machine.

Les solutions techniques et constructives sont présentées dans le tableau 7.

Fonctions principales	Solutions techniques	Solutions constructifs
Assurer le traitement de surface des pièces dans une chambre de travail en utilisant la force centrifuge,	Réaliser un mécanisme de transmission de mouvement rotatif pour faire tourner le disque dans la chambre de travail dans le but de créer une force centrifuge	✓ Moteur électrique ✓ Arbre récepteur fixé par serrage à la presse ✓ Chambre de travail sous forme tubulaire
Facilité de vider les médias de la chambre de travail après chaque utilisation,	Réaliser un mécanisme de balancement de la machine après chaque utilisation	✓ Système arbre-palier ✓ Système de fixation de la chambre de travail ✓ Un bras
Supporter le poids des médias et des pièces à traiter,	Fabrication d'une structure rigide et dimensionnement des différents systèmes de fixation	✓ Structure mécano-soudée ✓ Minimiser de poids net de la chambre de travail

CHAPITRE IV : Conception de la centrifugeuse

		✓ Dimensionner les vis de fixation
Eliminer le maximum des vibrations et du bruit,	Diminuer les vibrations dues aux défauts de forme des pièces rotatifs, et aux contacts entre les éléments de fixation	✓ Respecter les tolérances des pièces rotatives ✓ Utiliser les écrous autofreinés pour les fixations
Possibilité de varier la vitesse de rotation,	Intégré un dispositif électronique destiné à commander la vitesse de moteur électrique.	✓ Variateur de fréquence ✓ Câble électrique
Stabilité de la machine lors de fonctionnement.	La chambre de travail est en position verticale	✓ Utiliser des pieds réglables de la machine
Possibilité de l'amélioration continue de cette machine	Une structure démontable pour faciliter les modifications	✓ Utilisation des vis et boulons pour le montage

Tableau 7- Solutions techniques et constructives

IV.1.2- Liste des contraintes

La machine centrifugeuse est constituée de plusieurs éléments, chaque élément doit vérifier les contraintes bien définies. Les éléments principaux de la machine sont :

- 1) La structure de la machine,
- 2) La chambre de travail,
- 3) Le système de fixation de la chambre de travail,
- 4) Le moteur,
- 5) Le système de fixation du moteur.

Le tableau 8 illustre les contraintes à respecter pour chaque élément de la machine.

Élément	Contraintes
Structure de la machine	<ul style="list-style-type: none"> • Supporter le poids total de la machine • Forme et dimensions qui permettent le logement et le balancement de la chambre du travail • Assurer la stabilité • Un poids minimal
Chambre de travail	<ul style="list-style-type: none"> • Une forme qui permet le logement et la rotation du disque rotatif • Un matériau résistant contre l'usure pour supporter le contact avec les médias • La disponibilité et le coût
Système de fixation de la chambre de travail	<ul style="list-style-type: none"> • Supporter le poids de la chambre de travail, du moteur, des médias et des pièces à traiter • Laisser suffisamment d'espace dans la chambre du travail • Un système d'arbre-palier pour permettre le balancement de la chambre

CHAPITRE IV : Conception de la centrifugeuse

	<ul style="list-style-type: none"> • Fixation des éléments à l'aide des vis et boulons • Un poids minimal
Moteur	<ul style="list-style-type: none"> • Vitesse de rotation et puissance suffisantes pour le fonctionnement • Fixation en position verticale • Possibilité de fixation du disque rotatif • Possibilité de varier la vitesse • Un faible poids • La disponibilité et le coût
Système de fixation du moteur	<ul style="list-style-type: none"> • Supporter le poids du moteur, des pièces et médias lors du fonctionnement • Permettre le positionnement du moteur au centre de la chambre du travail • Démontable

Tableau 8- Liste des contraintes de chaque élément

IV.2- Conception des éléments de la centrifugeuse

IV.2.1- Chambre de travail

Dans les machines centrifugeuses industrielles, les parois latérales sont fabriquées en polyuréthane, ce dernier est antibruit et très résistant à l'usure, il permet de protéger la cuve durant la période de traitement. Dans notre machine nous avons optés à utiliser un tube en PVC qui vérifie les contraintes citées dans le cahier des charges ; la forme tubulaire est bien adapté, le PVC présente une grande résistance contre l'usure, disponible et surtout économique, les caractéristiques de tube sont présentées dans le tableau suivant :

	Ø extérieure [mm]	Ø intérieure [mm]	Langueur [mm]	Masse volumique [kg/m ³]	Masse [g]
Partie supérieure	319	304	300	1380	5343
Partie inférieure	334	318	170		

Tableau 9- Caractéristiques de tube en PVC

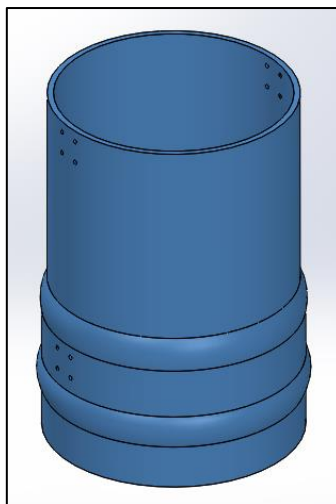


Figure 73- Chambre de travail

IV.2.2- Structure de la machine

IV.2.2.1- Structure principale

La forme et les dimensions de la structure de la machine ont été choisies en fonction des dimensions de la chambre de travail pour assurer le logement et le balancement de cette dernière, pour que la machine soit stable, résistante avec un poids minimale. Nous avons opté pour utiliser des cornières en acier S185 qui sont disponible au niveau de notre département, dont les caractéristiques sont illustrées dans le tableau 10 ci-dessous.

Matériau	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse volumique [kg/m ³]	Masse de la structure [g]
Acier S185	30	30	3	7800	14272

Tableau 10- Caractéristiques de la cornière utilisée

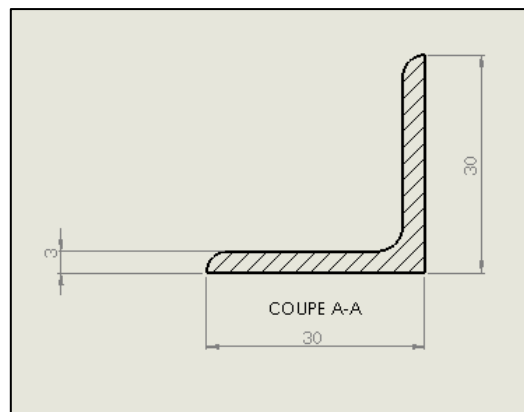


Figure 74- Vue en coupe de la cornière utilisée pour la structure de la machine

La structure est constituée de plusieurs éléments soudés de la cornière. La forme de la structure est montrée sur la figure 75

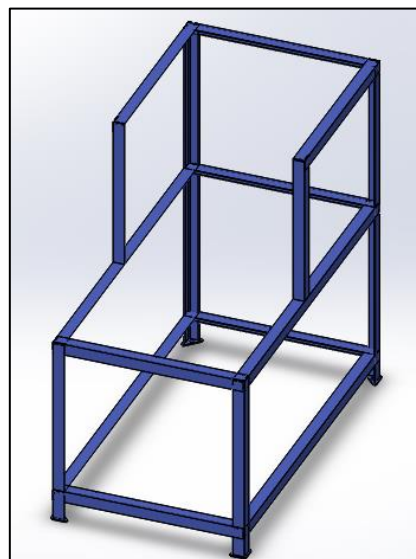


Figure 75- Forme de la structure

IV.2.2.2- Base de la structure

Pour qu'on puisse fixer des pieds à la base de la structure afin d'avoir une bonne stabilité statique de la machine, nous avons pensé à souder des petites plaques de forme triangulaire, coupées à partir d'une tôle en acier S235 comme la montre la figure 76.

Les dimensions de cette plaque ont été choisies pour assurer une bonne fixation des roues.

Matériau	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]
Acier S235	50	50	3	4x(26)

Tableau 11- Caractéristiques de la base de la structure

La figure suivante présente la base de la structure.

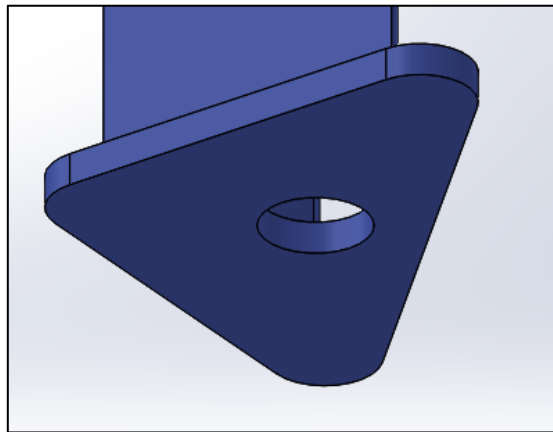


Figure 76- Base de la structure

IV.2.2.3- Couverture de la structure

Pour avoir une bonne esthétique, nous avons pensé à couvrir la structure extérieurement à l'aide d'une tôle de 1 mm d'épaisseur, fixée sur la structure par des rivets à œil sur les 3 faces de la structure comme la montre la figure 77.

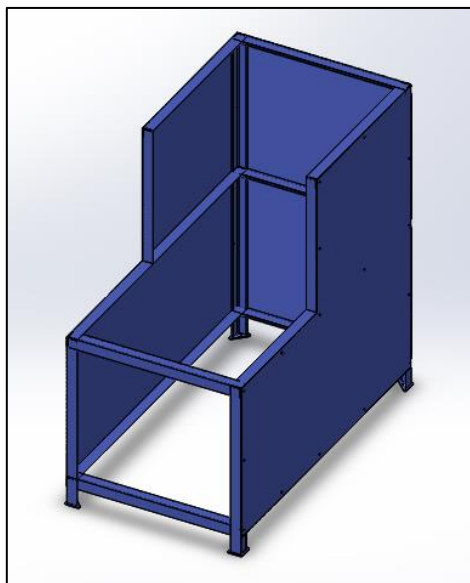


Figure 77- Couverture de la structure

CHAPITRE IV : Conception de la centrifugeuse

Les caractéristiques de la tôle utilisée sont montrées dans le tableau 12

Matériau	Epaisseur [mm]	Masse volumique [mm]	Masse des tôles latérales [g]	Masse de la tôle de face [g]
Acier S235	1	7800	2x(4715)	3312

Tableau 12- Caractéristiques de la tôle utilisé

IV.2.3- Fixation de la chambre du travail

Afin de faciliter la décharge des médias après traitement, on a opté pour un système arbre-palier, où les arbres sont fixés sur la chambre de travail et les paliers sur la structure fixe de la machine (figure 78) afin de faciliter démontage. Le système de fixation est subdivisé en 4 éléments.

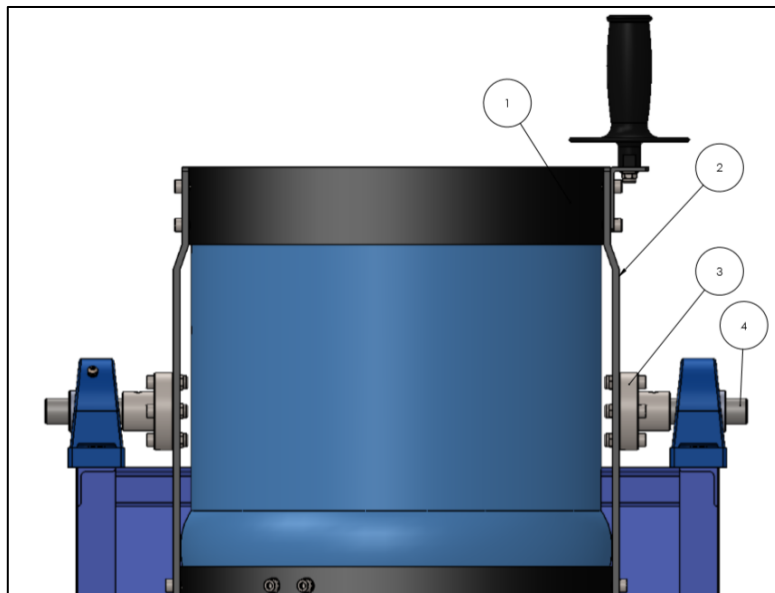


Figure 78- Fixation de la chambre de travail

1-Ceintures de fixation, 2- Supports, 3- Bagues, 4- Arbres

IV.2.3.1- Ceintures de fixation

Le rôle des ceintures de fixation est de supporter la charge appliquée sur la chambre de travail et d'éviter la fracturation de tube en PVC au niveau des trous. Il existe deux ceintures, l'une est montée sur la partie supérieure et l'autre sur la partie inférieure.

	Ø extérieure [mm]	épaisseur [mm]	Largeur [mm]	Matériau	Masse volumique [kg/m ³]	Masse [g]
Partie supérieure	324	2	60	Acier S235	7800	943
Partie inférieure	338	2	60			984

Tableau 13- Caractéristiques des ceintures

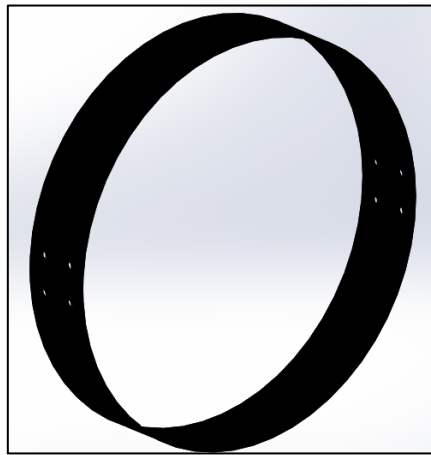


Figure 79- Ceinture de fixation

IV.2.3.2- Supports

Le rôle des deux supports est de relier les deux arbres à la chambre de travail, leurs forme et dimensions ont été choisies pour qu'ils se fixent sur les deux ceintures de diamètres différents et assurer le logement des écrous de fixation des bagues. Les quatre trous supérieurs et inférieurs sont pour objectif de fixer les supports par contre les trous du milieu sont pour objectif pour la fixation des bagues.

Matériau	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]
Acier S235	371	80	5	2x(967)

Tableau 14- Caractéristiques des supports



Figure 80- Support

IV.2.3.3- Brides

Afin d'éviter le soudage, nous avons choisi de fixer les deux axes sur les supports grâce à des brides où les axes sont montés avec serrage renforcés par une vis de pression afin d'empêcher tout glissement possible entre axes et alésages. Les caractéristiques du matériau utilisées ainsi que la pièce est montrée dans le tableau 15 et figure 81

Matériau	Masse volumique [kg/m ³]	Masse [g]
Acier S335	7800	2x(317)

Tableau 15- Caractéristiques des brides

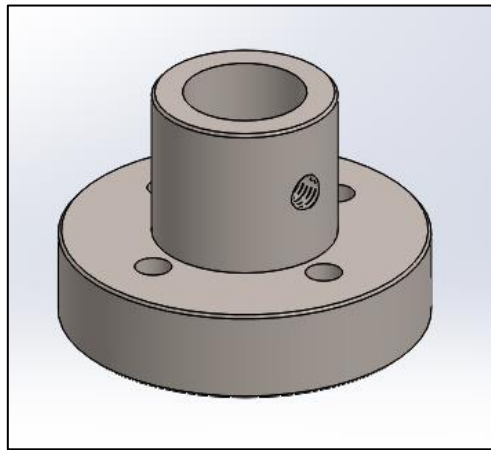


Figure 81- Brides

IV.2.3.4- Axes

Les axes nous permettent de faire balancer la chambre de travail sur des paliers pour faciliter la décharge des médias en fin de traitement, les axes sont montés avec serrage sur les brides et puis sur les paliers tout en respectant les ajustements. Les caractéristiques des axes sont montrées dans le tableau suivant :

Matériau	Longueur [mm]	Diamètre [mm]	Masse [g]
Acier S335	90	20	2x(167)

Tableau 16- Caractéristiques des axes

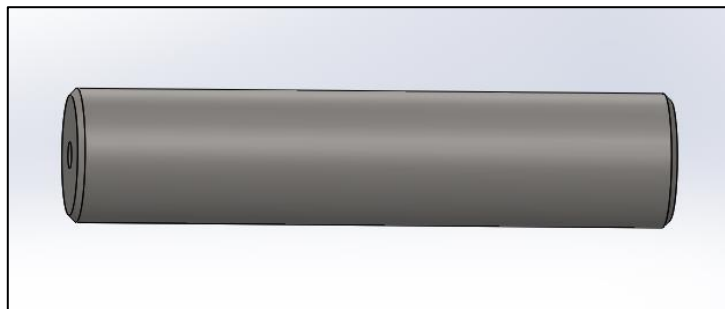


Figure 82- Axe

IV.2.3.5- Assemblage du système

- **Axe-bride**

Les axes sont montés avec serrage sur les brides à l'aide d'une presse, l'ajustement adéquat est 20H7/p6 car c'est l'ajustement le plus adapté pour un assemblage qui peut supporter des charges et transmettre des efforts [33], Le serrage est renforcé par une vis de pression (figure 83)

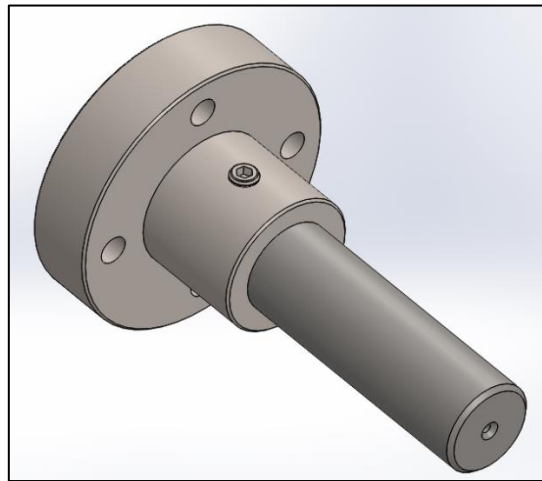


Figure 83- Assemblage axe-bride

- **Axe-bride**

L'assemblage axe bride est également réalisé par serrage à la presse 20H7/p6, plus deux vis de pression, la figure 84 montre le palier utilisé où ses caractéristiques sont citées dans le tableau 17.



Figure 84- Palier utilisé

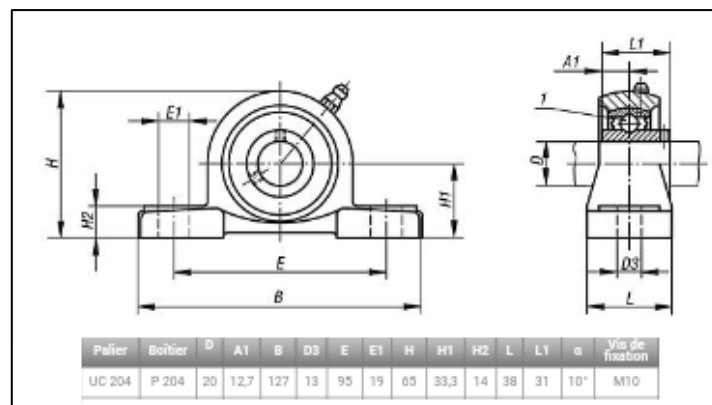


Figure 85- Dimensions du palier

CHAPITRE IV : Conception de la centrifugeuse

Model	Modèle du roulement	Matériau (corps)	Matériau (roulement)	Diamètre [mm]	Charge statique [kN]	Charge dynamique [kN]	Masse [kg]
P204	UC204	Fonte frise GL	Acier 100Cr6	20	6.7	12.7	0.59

Tableau 17- Caractéristiques du palier

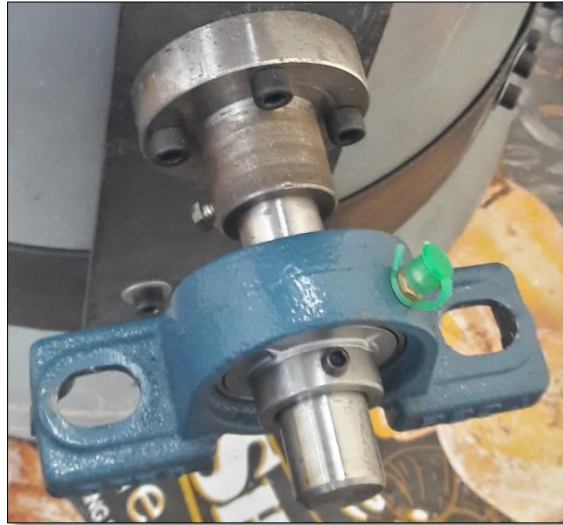


Figure 86- Assemblage axe-palier

- **Bride-support**

Les deux brides sont assemblées avec les deux supports à l'aide des vis-écrous M6 comme la montre la figure 87, les caractéristiques de vis utilisées sont illustrées dans le tableau 18.

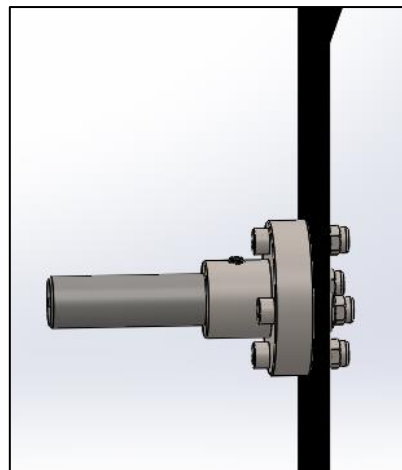


Figure 87- Bride-support

Les vis utilisées sont de type CHC d'une classe de 8.8 avec des écrous auto freinés.

Diamètre [mm]	Pas [mm]	Limite élastique [daN]	Résistance à la Rupture [daN]
6	1.00	1286	1610

Tableau 18- Caractéristiques des vis

- **Support-ceinture**

Les deux ceintures et la chambre de travail sont assemblés avec les deux supports (figure 88) par des vis de type CHC avec des écrous auto freiné, les caractéristiques de ces derniers sont les mêmes que celles du tableau précédent 18.

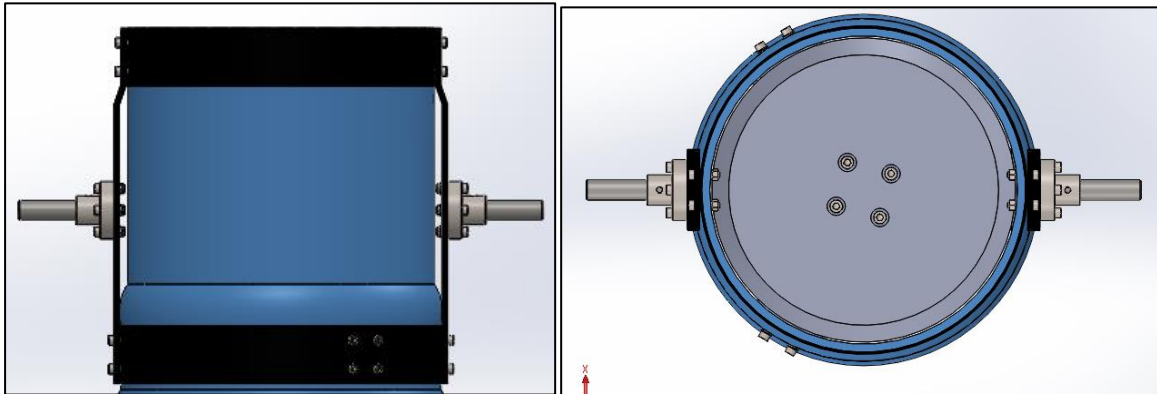


Figure 88- fixation des supports sur les ceintures de la chambre de travail

- **Levier**

Le levier monté à l'extrémité de la chambre de travail afin de la basculer vers le bas et vider les medias après chaque traitement. Ci-après figure 89.

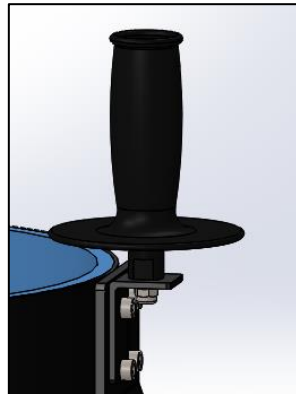


Figure 89- Levier de la machine

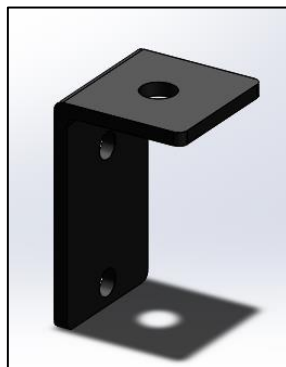


Figure 90- Equerre de fixation du levier

Les caractéristiques de l'équerre sont montrées dans le tableau 19.

Matériau	Epaisseur [mm]	Largeur [mm]	Longueur horizontale [mm]	Longueur verticale [mm]
Acier S235	3	30	30	50

Tableau 19- Caractéristiques de l'équerre

IV.2.4- Fixation du moteur

IV.2.4.1- Support du moteur

Le moteur doit se loger à l'intérieur sur la partie inférieure de la chambre de travail, comme il doit être centré pour éviter les défauts de rotation, il doit laisser suffisamment d'espace dans la chambre de travail pour le traitement et aussi pour le montage du disque rotatif. Puisque le moteur contient déjà deux supports de fixation orienté à 120° l'un par rapport à l'autre, il a été fixé sur une plaque (Figure 91) pour compléter le support qui manque. Les caractéristiques de la plaque sont regroupées dans le tableau 20.

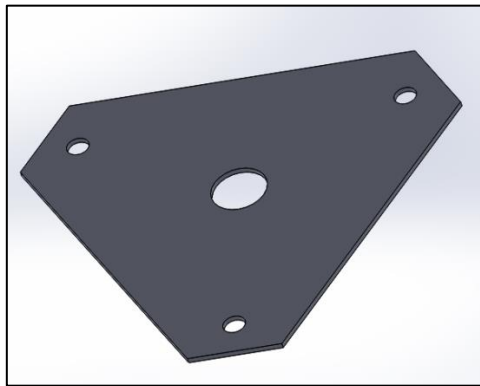


Figure 91- Plaque de fixation du moteur

Matériau	Epaisseur [mm]	Masse volumique [kg/m ³]	Masse [g]
Acier S235	2	7800	735

Tableau 20- Caractéristiques de la plaque

3 équerres ont été fabriquées afin de fixer le moteur par vissage dans la chambre de travail. Le rôle des équerres est de centrer et supporter la charge du moteur. La figure 92 montre le montage des équerres avec la plaque.

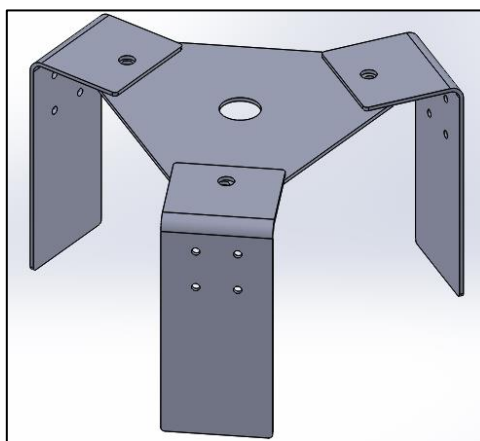


Figure 92- Assemblage plaque et équerres

CHAPITRE IV : Conception de la centrifugeuse

Les dimensions des équerres ont été choisies pour le but de centrer le moteur au milieu de la chambre de travail, les quatre trous ont pour objectif de fixer les équerres avec la chambre de travail, voir figure 93-94

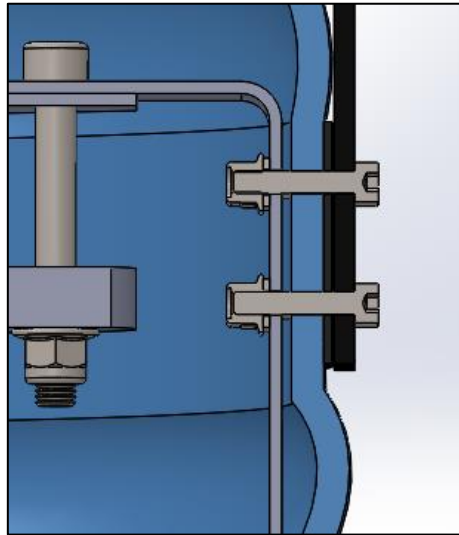


Figure 93- Vue en coupe du montage des équerres avec le support

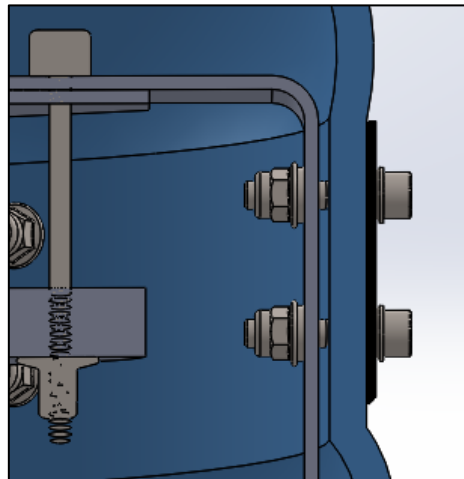


Figure 94- Vue en coupe du montage des équerres avec la ceinture

IV.2.4.2- Disque rotatif

- **Brides de transmission**

Pour transmettre le mouvement du moteur vers le disque, on a mis en disposition une bride de transmission montée avec serrage à la presse sur l'arbre du moteur.

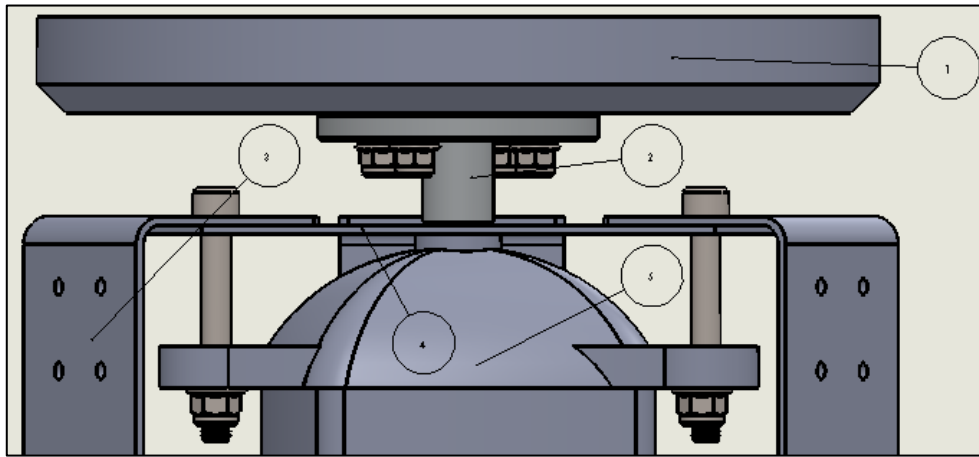


Figure 95- Transmission du mouvement du moteur vers le disque rotatif

1-Disque rotatif, 2- Bride de transmission, 3- Equerre de fixation, 4- Plaque de fixation, 5- Moteur.

L'ajustement choisi du montage entre la bague de transmission et l'arbre du moteur est de 10H7/p6, le choix du matériau pour la bague de transmission est porté pour un acier doux S335 afin d'assurer une meilleure longévité.

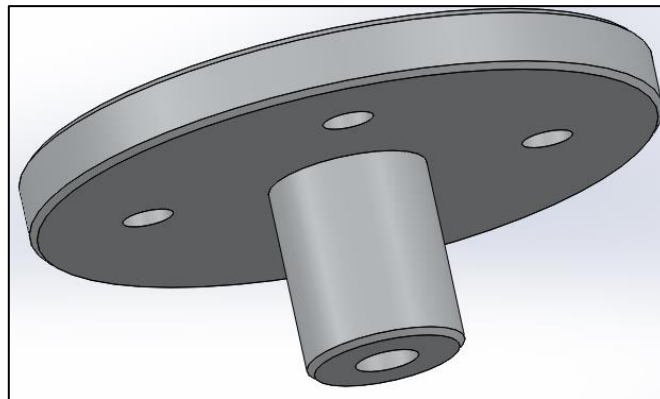


Figure 96- Bride de transmission

• Disque rotatif

Le disque rotatif illustré sur la figure 97 est monté à l'intérieur de la chambre de travail avec un jeu de 2 millimètres par rapport aux parois afin d'assurer une rotation libre.

La rotation du disque avec son extrémité qui forme un angle de 140° permet de créer un mouvement de rotation toroïdal favorable à la circulation libre du milieu actif (pièces-medias).

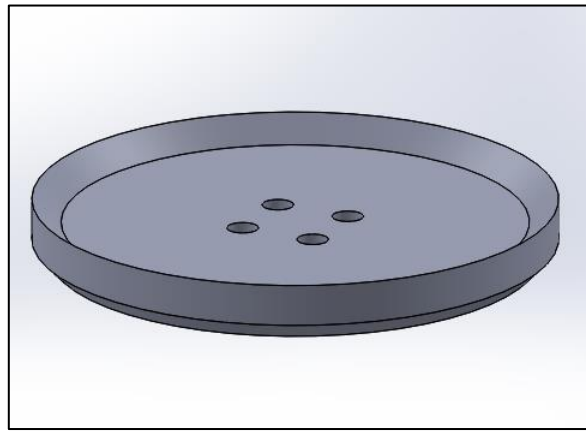


Figure 97- Disque rotatif

Le choix du matériau du disque rotatif a été porté sur le POLYACETAL Souvent désigné par le nom POM C, ci-après on présente les caractéristiques suivantes :

- ✓ Haute résistance mécanique, rigidité, dureté,
- ✓ Bonne résistance à la fatigue,
- ✓ Bonnes propriétés de glissement,
- ✓ Excellente résistance à l'usure,
- ✓ Meilleure usinabilité,
- ✓ Légèreté du poids pour minimiser les vibrations.

IV.2.5- Partie électrique

IV.2.5.1- Moteur

Le moteur se situe à l'intérieur et en bas de la chambre de travail. Dans cette machine le moteur joue un rôle très important, il doit être bien choisi pour assurer le traitement.

Nous avons utilisé un moteur récupéré à partir d'une machine à laver, qui est caractérisé par un faible poids, fixable et fonctionnel en position verticale. La figure 98 montre le moteur utilisé.



Figure 98- Moteur électrique

Type	Puissance [W]	Vitesse de rotation [tr/min]	Poids [g]
Moteur universel	500	1300	3437

Tableau 21- Caractéristiques du moteur

IV.2.5.2- Variateur de vitesse

Afin de changer la vitesse de rotation du moteur, un variateur de vitesse (figure 99) a été mis en disposition. Ce variateur est bien adapté au moteur utilisé. Les caractéristiques de ce dernier sont montrées dans le tableau 22.



Figure 99- Variateur de vitesse

Type	Fabricant	Alimentation	Puissance
Variateur monophasé	INVERTER	220V	750 W

Tableau 22- Caractéristiques du variateur de vitesse

IV.3- Calcul, dimensionnement, simulation et ajustement

IV.3.1- Simulation de la structure

En supposant que la base de la structure est encastrée au sol et que la structure supporte une charge de 50 kg composée de la chambre de travail remplie de médias et pièces mécaniques. Nous avons fait une simulation numérique sous le logiciel SOLIDWORKS 2016, pour s'assurer de sa résistance aux charges critiques. La figure 100 montre les étapes de la structure.

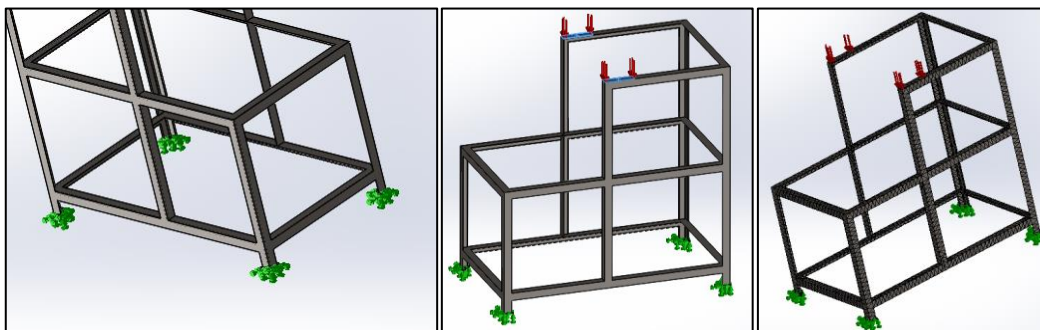


Figure 100- Etapes de simulation de la structure

Les résultats de cette simulation (figure 101), indiquent que la contrainte maximale de Von mises est de 37.18 MPa et la déformation équivalente maximale est de 0.01048 %. La limite élastique de ce matériau est de 250 MPa. Donc la structure résiste avec un coefficient

de sécurité de 6.7. En plus de ça, les charges usuellement appliqués sont très inférieures à la charge appliquée durant cette simulation.

Sur cette figure, on peut voir les résultats de la simulation (contraintes, et déformation).

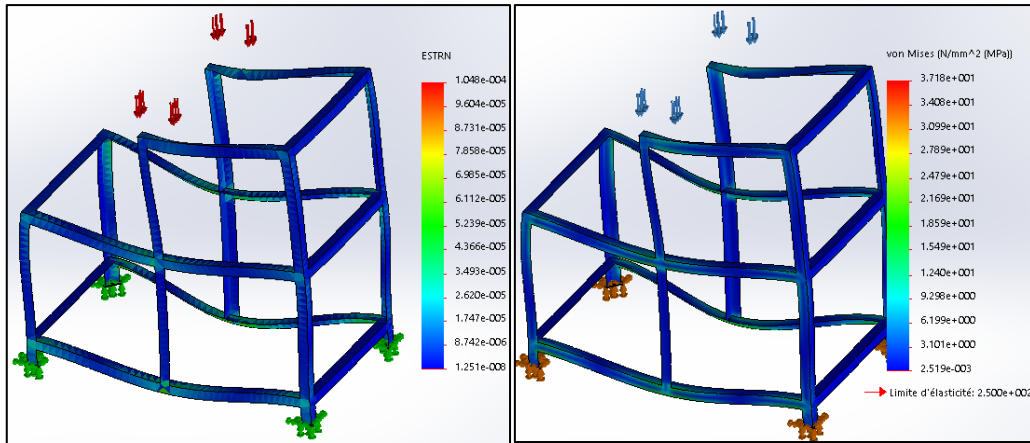


Figure 101- Résultats de la simulation de la structure

IV.3.2- Résistance du système de fixation

IV.3.2.1- Calcul de la résistance des vis

- **Vis de fixation de la chambre de travail**

Pour vérifier la résistance des vis de fixation de la chambre de travail, il suffit de vérifier les vis qui subissent la plus grande charge. Dans ce cas les vis à vérifier sont ceux des bagues (figure 102), qui doivent résister essentiellement au cisaillement due au poids de la chambre de travail.

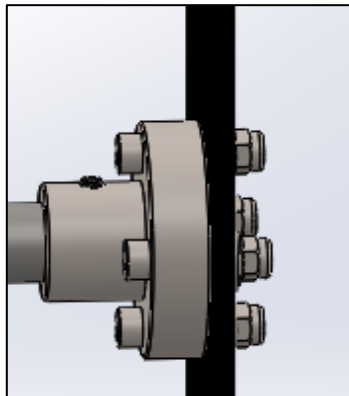


Figure 102- Vis des brides

On a :

$$\begin{cases} M_{\text{Chambre de travail}} = 20 \text{ kg} \\ M_{\text{médiâs(estimée)}} = 30 \text{ kg} \\ d_{\text{vis}} = 6 \text{ mm} \end{cases}$$

Les vis utilisées sont de classe de qualité de 8.8, donc leur limite élastique à la traction $R_{e\text{est}}$:

$$R_e = 8 \times 8 \times 10 = 640 \text{ N/mm}^2$$

CHAPITRE IV : Conception de la centrifugeuse

La limite élastique par cisaillement R_{eg} est calculée selon la formule suivante :

$$R_{eg} = 0.6 \times R_e = 0.6 \times 640 = 384 \text{ N/mm}^2$$

Divisé par le coefficient de sécurité $s = 2$

$$R_{pg} = \frac{R_{eg}}{s} = \frac{384}{2} = 192 \text{ N/mm}^2$$

La charge totale appliqué F est :

$$F = (M_{\text{Chambre de travail}} + M_{\text{médias(estimée)}}) \times g = (20 + 30) \times 10 = 500 \text{ N}$$

La charge appliquée sur vis

$$F_{vis} = \frac{F}{n_{vis}} = \frac{500}{8} = 62.5 \text{ N}$$

La contrainte de cisaillement est :

$$\tau = \frac{F_{vis}}{\frac{\pi d_{vis}^2}{4}} = 2.21 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \ll R_{pg} = 192 \text{ N/mm}^2$$

Donc la résistance des vis au cisaillement est bien vérifiée.

• Vis de fixation du moteur

Les vis de fixation du moteur (figure 103) subissent une charge de traction, due essentiellement aux poids du disque rotatif, de la bague de transmission, du moteur et le poids des médias.

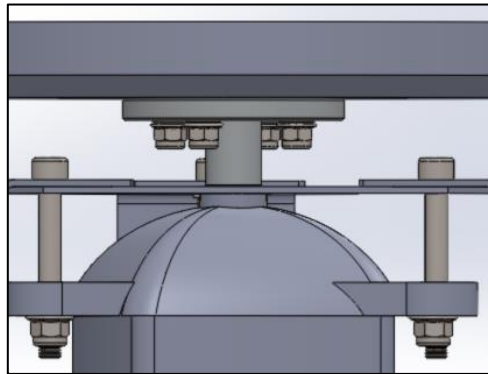


Figure 103- Vis du moteur

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{\text{éléments}} = 7 \text{ kg} \\ M_{\text{médias(estimée)}} = 30 \text{ kg} \\ d_{vis} = 6 \text{ mm} \end{array} \right.$$

Les vis utilisées sont de classe de qualité de 8.8, donc la limite élastique R_e est :

$$R_e = 8 \times 8 \times 10 = 640 \text{ N/mm}^2$$

La charge maximale que la vis peut supporter R_{eg} est :

$$R_{eg} = 0.9 \times R_e = 0.9 \times 640 = 576 \text{ N/mm}^2$$

Divisé par le coefficient de sécurité $s = 2$

$$R_{pg} = \frac{R_{eg}}{s} = \frac{576}{2} = 288 \text{ N/mm}^2$$

La charge totale appliqué F est :

$$F = (M_{\text{éléments}} + M_{\text{médias(estimée)}}) \times g = (7 + 30) \times 10 = 370 \text{ N}$$

La charge appliquée par vis

$$F_{vis} = \frac{F}{n_{vis}} = \frac{370}{2} = 185 \text{ N}$$

La contrainte de traction est :

$$\tau = \frac{F_{vis}}{\frac{\pi d_{vis}^2}{4}} = 6.54 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \ll R_{pg} = 288 \text{ N/mm}^2$$

Donc la résistance des vis à la traction est bien vérifiée.

IV.3.2.2- Simulation des équerres

En supposant que les équerres de fixation du moteur sont encadrées par les vis de fixation, ces derniers subissent une flexion. Pour vérifier leurs résistances nous allons simplifier le problème en une seule équerre et faire une simple simulation sur le logiciel SOLIDWORKS 2016. Les équerres subissent une force de 370 N, partagée sur les trois. Donc 123.33 N pour chaque équerre.

Les étapes de la simulation sont montrées sur la figure 104.

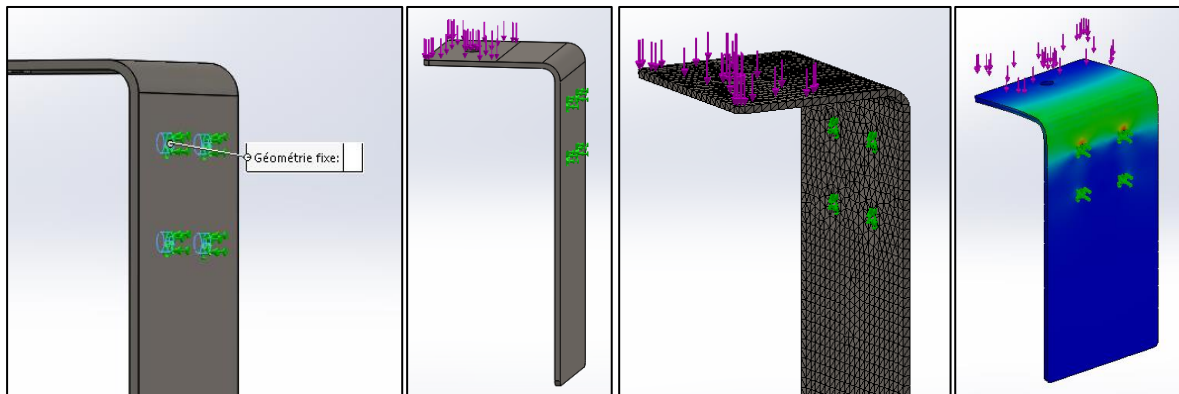


Figure 104- Etapes de la simulation

La contrainte maximale de Von Mises trouvée est de 117.2 MPa, or que, la limite élastique du matériau est de 250 MPa. Donc les équerres résistent avec un coefficient de sécurité de 2.1. En plus de ça, les charges appliquées lors des traitements sont très inférieures à la charge appliquée pour cette simulation. La figure 105 montre les résultats de la simulation (contraintes et déformations) d'où la déformation maximale est de 0.03677 %.

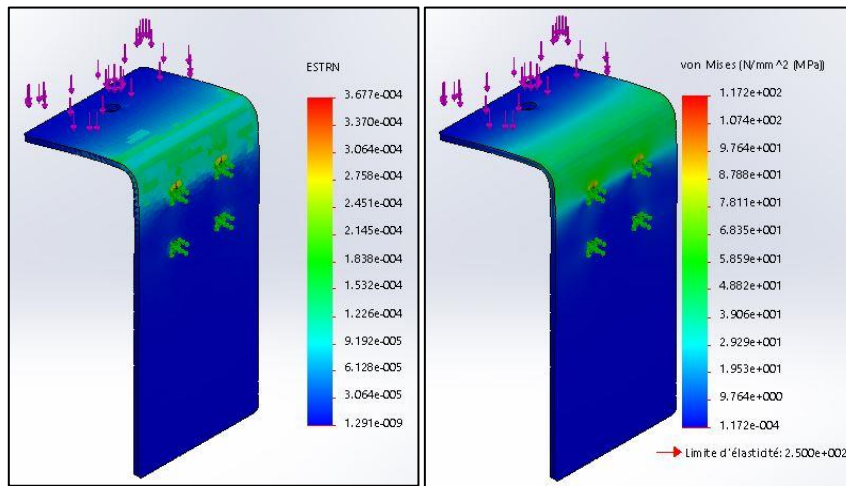


Figure 105- Résultats de la simulation

IV.3.2- Calcul des ajustements

Pour le cas étudié, il existe un seul ajustement en l'occurrence l'ajustement avec serrage de 20H7/p6 entre les axes et les brides ainsi que les paliers et 10H7/p6 entre la bride de transmission et l'arbre du moteur, le calcul des ajustements permet de déterminer les tolérances géométriques de différents composants de la machine.

- **Ajustements 20H7/p6 [24]**

La norme ISO 286 donne :

- Tolérance sur l'axe :

$$d = 20p6 = 20^{+0.035}_{+0.022} \Rightarrow IT_d = 35 - 22 = 13 \mu\text{m}$$

IT_d : intervalle de tolérance

Donc : $es = + 35 \mu\text{m}$ et $ei = + 22 \mu\text{m}$

- Tolérance sur la bride intérieure :

$$D = 20H7 = 20^{+0.021}_{+0} \Rightarrow IT_d = 21\mu\text{m}$$

Donc : $ES = + 21 \mu\text{m}$ et $EI = + 0 \mu\text{m}$

✓ $J_{\max} = ES - ei = 21 - 22 = - 1 \mu\text{m}$

✓ $J_{\min} = EI - es = 0 - 35 = - 35 \mu\text{m}$

✓ Serrage moyen : $J_{\text{moy}} = \frac{J_{\max} + J_{\min}}{2} = \frac{-1-35}{2} = -18\mu\text{m}$

- **Ajustements 10H7/p6**

La norme ISO 286 donne :

- Tolérance sur l'arbre :

$$d = 10p6 = 10^{+0.029}_{+0.018} \Rightarrow IT_d = 29 - 18 = 11 \mu\text{m}$$

Donc : $es = + 29 \mu\text{m}$ et $ei = + 18 \mu\text{m}$

- Tolérance sur la bride intérieure :

$$D = 10H7 = 10^{+0.018}_{+0} \Rightarrow IT_d = 18\mu\text{m}$$

Donc : $ES = + 18 \mu\text{m}$ et $EI = + 0 \mu\text{m}$

✓ $J_{\max} = ES - ei = 18 - 18 = 0 \mu\text{m}$

✓ $J_{\min} = EI - es = 0 - 29 = -29 \mu\text{m}$

✓ Serrage moyen : $J_{\text{moy}} = \frac{J_{\max} + J_{\min}}{2} = \frac{0 - 29}{2} = -14.5 \mu\text{m}$

Nous avons une règle qui dit la somme des tolérances de perpendicularité est égale au jeu minimal de l'ajustement [8]

Donc nous avons une tolérance de $\frac{-35}{2} = 17.5 \mu\text{m}$ pour les ajustements de 20H7/p6

Et de $\frac{-29}{2} = -14.5 \mu\text{m}$ pour les ajustements de 10H7/p6.

IV.4- Schéma cinématique de la machine

Le schéma cinématique est une représentation simplifiée et codée d'un mécanisme, qui ne tient compte ni des formes, ni des dimensions de ce dernier, et qui obéit à une norme. Il traduit de façon simple le fonctionnement cinématique du mécanisme et il est utilisé en :

- Analyse pour appréhender rapidement le fonctionnement.
- Conception pour exprimer rapidement la solution technique liée à une fonction de service.

IV.4.1- Graphe de liaison

C'est un modèle cinématique du mécanisme, c'est à dire une interprétation en termes de mouvements relatifs possibles entre pièces.

La machine centrifugeuse possède 3 groupes cinématique qui sont :

Groupe 1 : La structure de la machine, Groupe 2 : La chambre de travail,

Groupe 3 : le disque rotatif

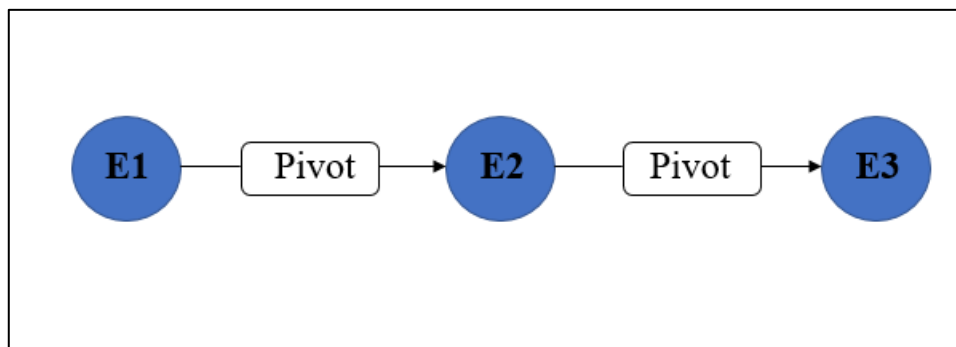


Figure 106- Graphe de liaison de la centrifugeuse

— : Liaison

E : Groupe cinématique

Pivot : Type de liaison

IV.4.2- Schéma cinématique de la centrifugeuse

La centrifugeuse conçue et réalisée possède deux mouvements indépendants l'un de l'autre, le premier mouvement rotatif du disque généré par le moteur et le second mouvement de rotation permettant la chambre de travail de se basculer afin de décharger les medias. La chambre du travail reste fixe durant le traitement, seul le fond tournant effectue un mouvement de rotation transmettant aux medias une force centrifuge tout en créant un tort. La figure 107 montre le schéma cinématique de la machine centrifugeuse.

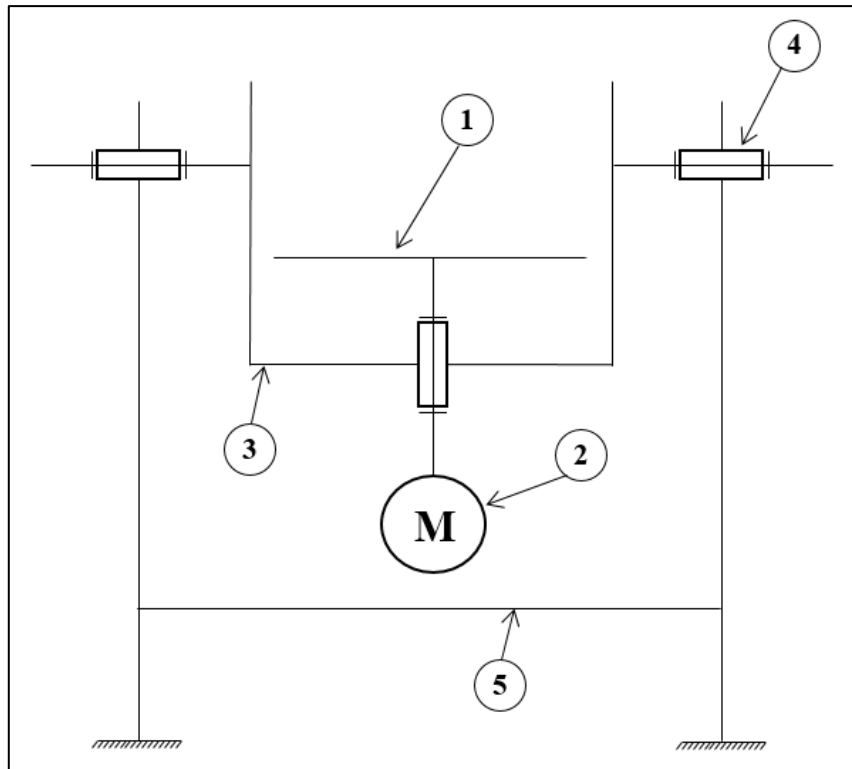


Figure 107- Schéma cinématique de la centrifugeuse

1-Disque rotatif, 2- Moteur, 3- Chambre de travail, 4- Palier, 5- Structure de la machine

Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une étude conceptuelle des éléments de la centrifugeuse, tout en faisant un schéma cinématique, des dessins de définitions et d'assemblage en respectant les tolérances dimensionnelles et géométriques (voir l'annexe).

En ce qui concerne les calculs analytique et les simulations numériques, les résultats montre que les éléments de la machine résistent largement aux charges appliquées.

Après cette étude conceptuelle notre machine centrifugeuse est prête à être réaliser.

Chapitre V

Réalisation de la centrifugeuse à fond tournant

Introduction

Après avoir conçu la machine centrifugeuse, dans ce chapitre nous allons élaborer les gammes de fabrication, d'usinage et d'assemblage des composants de la machine en s'appuyant sur les dessins de définition et d'assemblage

Une fois que les gammes sont prêtes, on commence la fabrication des éléments mécano-soudée de la structure de machine et puis on réalise les pièces qui ont une certaine précision par procédés d'usinage (tournage, fraisage), tout en respectant les cotations des dessins de définition.

Après la fabrication de ces derniers, on passe à l'assemblage et au montage des éléments en question.

A la fin du montage, des essais de vérification ont été effectués afin de s'assurer du bon fonctionnement de la machine.

IV.1- Fabrication de la structure

IV.1.1- Gammes de fabrication et d'assemblage de la structure

La gamme de fabrication est une liste de toutes les étapes à exécuter dans le but de réaliser les pièces qui compose un objet technique, tout en précisant les méthodes, les durées, les moyens de fabrication et de contrôle. Une gamme de fabrication doit décrire chaque étape (opération, phase, séquence).

Pour chaque étape il est précisé l'ensemble des moyens utilisés :

- poste de travail.
- opérations nécessaires.
- outillage et matériaux bruts.
- contrôle.

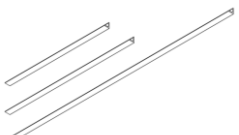
Gamme de fabrication		Nom de la pièce :	Séquence : 2h	Matériau :	Dimension de brut :
		Eléments de la Structure		Acier S185	2 Cornières de 30x30x3, 6m de longueur
		Nombre de pièces : 16		Etabli par : BOUMZOU Mohammed Amokrane	
N° phase	Désignation	Machine	Outil	Contrôle	Croquis
1	Traçage		Réglet Pointeau Double mètre	Réglet Double mètre	
2	Découpage	Tronçonneuse Étau	Disque abrasifs	Visuel Double mètre	

Tableau 23- Gamme de fabrication des éléments de la structure

CHAPITRE V : Réalisation de la centrifugeuse

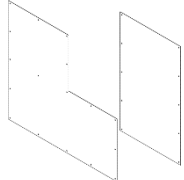
Gamme de fabrication		Nom de la pièce : Tôle pour couverture de la structure	Séquence : 30 min	Matériau : Acier S235	Dimension de brut : Tôle de 1200x3000x1
		Nombre de pièces : 3			Etabli par : BOUMZOU Mohammed Amokrane
N° phase	Désignation	Machine	Outil	Contrôle	Croquis
1	Traçage		Réglet Pointeau Double mètre	Réglet Double mètre	
2	Découpage	Cisaille à guillotine, capacité 3 mm max	Deux lames en acier inoxydable	Visuel Double mètre	

Tableau 24- Gamme de fabrication de la tôle pour couverture de la structure


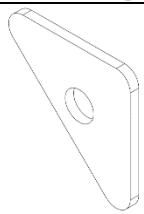
Gamme de fabrication		Nom de la pièce : Base de la structure	Séquence : 1h	Matériau : Acier S235	Dimension de brut : Tôle de 300x200x3
		Nombre de pièces : 4			Etabli par : BOUMZOU Mohammed Amokrane
N° phase	Désignation	Machine	Outil	Contrôle	Croquis
1	Traçage		Réglet Pointeau Double mètre	Visuel Double mètre	
2	Découpage	Cisaille à guillotine, capacité 3 mm max	Deux lames en acier inoxydable	Visuel Double mètre	
3	Perçage	Perceuse manuelle	Foret \varnothing 10	Visuel	

Tableau 25- Gamme de fabrication de la base de la structure

CHAPITRE V : Réalisation de la centrifugeuse

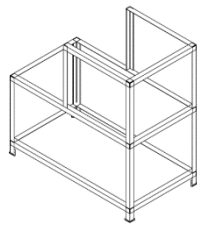
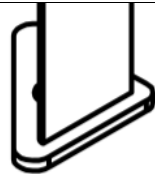
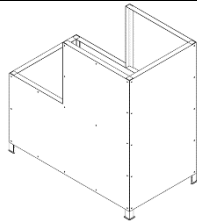
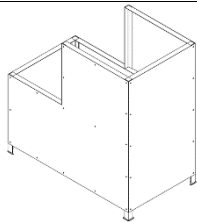
Gamme d'assemblage		Nom de l'assemblage : Structure de la machine	Séquence : 4h	Matériau : Acier S185, Acier S235	
		Nombre de pièces à assembler : 23		Etabli par : BOUMZOU Mohammed Amokrane	
N° phase	Désignation	Machine	Outil	Contrôle	Croquis
1	Soudage électrique	Poste à souder	Electrode de dimension $\phi 3.2$ mm	Réglet Equerre Double mètre	
2	Soudage électrique	Poste à souder	Electrode de dimension $\phi 3.2$ mm	Réglet Equerre Double mètre	
3	Perçage	Perceuse manuelle	Foret $\phi 5$	Visuel Réglet Pointeau	
4	Rivetage	Riveteuse manuelle	Rivets $\phi 4$	Visuel	

Tableau 26- Gamme d'assemblage de la structure

IV.1.2- Réalisation de la structure

La réalisation de la structure a été faite en suivant les étapes citées dans les gammes de fabrication et en respectant les dimensions des dessins normalisés. Nous l'avons réalisé au niveau de notre département (génie mécanique), suite à la disponibilité de l'outillage nécessaire. Les figures qui suivent, montre quelques étapes de réalisation.

CHAPITRE V : Réalisation de la centrifugeuse



Figure 108- Traçage découpage et soudage le la structure

Les tôles ont été fixées sur la structure à l'aide des rivets à œil comme le montre la figure 109.



Figure 109- Couverture de la structure

Après l'assemblage de la structure et sa couverture en tôle, on est passé à l'étape de finition ou nous avons peint la structure d'abord avec l'anti rouille et puis avec une couleur bleu métallisée comme le montrent les figures qui suivent.



Figure 110- Finition de la structure

IV.2- Fixation de la chambre de travail

IV.2.1- Gammes de fabrication et d'usinage


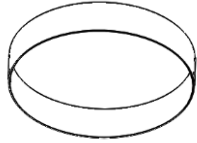
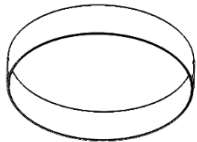

Gamme de fabrication		Nom de la pièce : Ceintures	Séquence : 1h	Matériau : Acier S235	Dimension de brut : Tôle de 1000x150x3
		Nombre de pièces : 2			Etabli par : BOUMZOU Mohammed Amokrane
N° phase	Désignation	Machine	Outil	Contrôle	Croquis
1	Traçage		Réglet Pointeau Double mètre	Visuel Double mètre	
2	Découpage	Cisaille à guillotine, capacité 3 mm max	Deux lames en acier inoxydable	Visuel Double mètre	
3	Cintrage	Cintreuse manuelle	3 laminaires	Réglet Double mètre	
4	Soudage électrique	Poste à souder	Electrode de dimension ø3.2 mm	Réglet Double mètre	

Tableau 27- Gamme de fabrication des ceintures

Gamme de fabrication		Nom de la pièce : Support	Séquence : 2h	Matériau : Acier S235	Dimension de brut : barre de 3000x80x5
		Nombre de pièces : 2			Etabli par : BOUMZOU Mohammed Amokrane
N° phase	Désignation	Machine	Outil	Contrôle	Croquis
1	Traçage		Réglet Pointeau Double mètre	Visuel Double mètre	
2	Découpage	Cisaille à guillotine, capacité 3 mm max	Deux lames en acier inoxydable	Visuel Double mètre	

CHAPITRE V : Réalisation de la centrifugeuse



3	Pliage	Plieuse manuelle	Mâchoires fixe et mobile	Réglet Double mètre	
4	Perçage	Perceuse à colonne	Foret $\varnothing 6$	Réglet Double mètre	

Tableau 28- Gamme de fabrication des supports



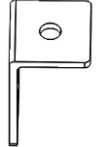
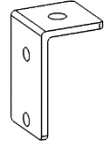
Gamme de fabrication		Nom de la pièce : équerre du levier	Séquence : 30 min	Matériau : Acier S235	Dimension de brut : Tôle de 100x50x3
		Nombre de pièces : 2		Etabli par : BOUMZOU Mohammed Amokrane	
N° phase	Désignation	Machine	Outil	Contrôle	Croquis
1	Traçage		Réglet Pointeau Double mètre	Visuel Double mètre	
2	Découpage	Cisaille à guillotine, capacité 3 mm max	Deux lames en acier inoxydable	Visuel Double mètre	
3	Pliage	Plieuse manuelle	Mâchoires fixe et mobile	Réglet Equerre Double mètre	
4	Perçage	Perceuse à colonne	Foret $\varnothing 8$	Réglet Double mètre	
5	Perçage	Perceuse à colonne	Foret $\varnothing 6$	Réglet Double mètre	

Tableau 29- Gamme de fabrication de l'équerre du levier

CHAPITRE V : Réalisation de la centrifugeuse

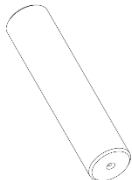
Gamme d'usinage		Nom de la pièce : Axe	Dimension de brut : Ø22x80	Matériau : Acier S335	Séquence : 6h
		Nombre de pièces : 2		Etabli par : BOUMZOU Mohammed Amokrane	
N° phase	Désignation des phases	Machine	Outil	Contrôle	Croquis
1	Contrôle de brut		Pied à coulisse	Visuel Pied à coulisse	
2	Tournage A/ Dressage B/ Centrage C/ Chariotage D/ Chanfreinage E/ Tronçonnage	Tour conventionnel	Foret à contrer Outil à dresser Outil à charioter Outil à tronçonner	Pied à coulisse Micromètre	

Tableau 30- Gamme d'usinage des axes

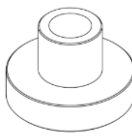
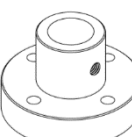
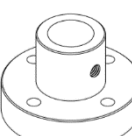
Gamme d'usinage		Nom de la pièce : Bride	Dimension de brut : Ø60x80	Matériau : Acier S335	Séquence : 8h
		Nombre de pièces : 2		Etabli par : BOUMZOU Mohammed Amokrane	
N° phase	Désignation des phases	Machine	Outil	Contrôle	Croquis
1	Contrôle de brut		Pied à coulisse	Visuel Pied à coulisse	
2	Tournage A/ Dressage B/ Chariotage C/ Perçage D/ Alésage E/ Chanfreinage F/ Tronçonnage	Tour conventionnel	Outil à dresser Outil à charioter Foret de Ø16 Outil à aléser Outil à tronçonner	Pied à coulisse Micromètre Tampon 20H7	
3	Perçage	Fraiseuse	Foret de Ø6 Diviseur de 60	Pied à coulisse	
4	Taraudage	Manuelle	Taraud M6 Tourne à gauche Étau	Visuel	

Tableau 31- Gamme d'usinage des brides

CHAPITRE V : Réalisation de la centrifugeuse

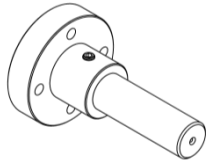
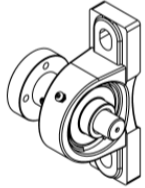
Gamme d'assemblage		Nom de l'assemblage : Axe- bride- palier	Séquence : 1h	Matériau : Acier S335	
		Nombre de pièces à assembler : 6		Etabli par : BOUMZOU Mohammed Amokrane	
N° phase	Désignation	Machine	Outil	Contrôle	Croquis
1	Assemblage par pression	Presse manuelle capacité de 15 tonnes	Vérin hydraulique Piston Base	Réglet Visuel	
2	Assemblage par pression	Presse manuelle capacité de 15 tonnes	Vérin hydraulique Piston Base	Réglet Visuel	

Tableau 32- Gamme d'assemblage des axes

IV.2.2- Réalisation

La réalisation des pièces de fixation de la chambre de travail a été faite en suivant les étapes citées dans les gammes de fabrication et en respectant les dimensions par des dessins de définition. Nous les avons réalisés au niveau de notre département vu que tous l'outillage nécessaire est disponible. Les figures qui suivent, montre quelques étapes de réalisation.



Figure 111- Ceintures

CHAPITRE V : Réalisation de la centrifugeuse



Figure 112- Supports



Figure 113- Levier et équerre



Figure 114- Réalisation des axes

CHAPITRE V : Réalisation de la centrifugeuse

Pour avoir un bon ajustement, on a contrôlé l'alésage à l'aide d'un tampon lisse de 20H7



Figure 115- Réalisation des brides

Les figures suivantes montrent le montage des axes avec les brides et les paliers en utilisant une presse manuelle d'une capacité de 15 tonne, avec une force maximale de 5 tonnes.



Figure 116- Assemblage d'axes-brides-paliers

CHAPITRE V : Réalisation de la centrifugeuse

Les différents éléments de la chambre de travail ont été assemblés par des vis de type CHC de 6 mm de diamètre avec une classe de qualité de 8.8, comme le montre la figure 117.



Figure 117- Montage de la chambre de travail

Et finalement la chambre de travail ainsi que les éléments de fixation a été peint par les deux couleurs, bleue pour la chambre et noire pour les ceintures et les supports comme le montre la figure 118.



Figure 118- Finition de la chambre de travail

IV.3- Fixation du moteur

IV.3.1- Gammes de fabrication et d'usinage


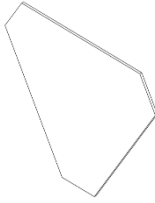
Gamme de fabrication		Nom de la pièce : équerre	Séquence : 2h	Matériau : Acier S235	Dimension de brut : Tôle de 500x300x3
		Nombre de pièces : 3			Etabli par : BOUMZOU Mohammed Amokrane
N° phase	Désignation	Machine	Outil	Contrôle	Croquis
1	Traçage		Réglet Pointeau Double mètre	Visuel Double mètre	
2	Découpage	Cisaille à guillotine, capacité 3 mm max	Deux lames en acier inoxydable	Visuel Double mètre	
3	Pliage	Plieuse manuelle	Mâchoires fixe et mobile	Réglet Equerre Double mètre	
4	Perçage	Perceuse à colonne	Foret ø 6	Réglet Double mètre	

Tableau 33- Gamme de fabrication des équerres

Gamme de fabrication		Nom de la pièce : Plaque du moteur	Séquence : 1h	Matériau : Acier S235	Dimension de brut : Tôle de 300x200x3
		Nombre de pièces : 1			Etabli par : BOUMZOU Mohammed Amokrane
N° phase	Désignation	Machine	Outil	Contrôle	Croquis
1	Traçage		Réglet Pointeau Double mètre	Réglet Double mètre	
2	Découpage	Cisaille à guillotine, capacité 3 mm max	Deux lames en acier inoxydable	Visuel Double mètre	

CHAPITRE V : Réalisation de la centrifugeuse

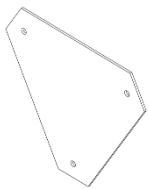
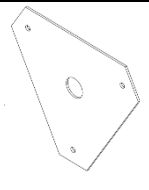
3	Perçage	Perceuse à colonne	Foret $\varnothing 6$	Réglet Double mètre	
4	Perçage	Perceuse à colonne	Foret $\varnothing 25$	Réglet Double mètre	

Tableau 34- Gamme de fabrication de la plaque du moteur

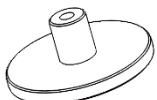
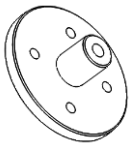
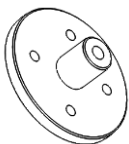
Gamme d'usinage		Nom de la pièce : Bride de transmission	Dimension de brut : $\varnothing 110 \times 80$	Matériau : Acier S335	Séquence : 8h
		Nombre de pièces : 1		Etabli par : BOUMZOU Mohammed Amokrane	
N° phase	Désignation des phases	Machine	Outil	Contrôle	Croquis
1	Contrôle de brut		Pied à coulisse	Visuel Pied à coulisse	
2	Tournage A/ Dressage B/ Chariotage C/ Perçage D/ Alésage E/ Chanfreinage F/ Tronçonnage	Tour à commande numérique	Outil à dresser Outil à charioter Foret de $\varnothing 9$ Outil à aléser Outil à tronçonner	Pied à coulisse Micromètre Tampon 10H7	
3	Perçage	Fraiseuse	Foret de $\varnothing 8$ Diviseur de 60	Pied à coulisse	
4	Rectification	Rectifieuse plane	Meule	Micromètre	

Tableau 35- Gamme d'usinage de la bride de transmission

CHAPITRE V : Réalisation de la centrifugeuse


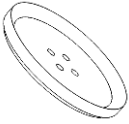
Gamme d'usinage		Nom de la pièce : Disque rotatif	Dimension de brut : $\varnothing 300 \times 80$	Matériau : Polycétal POM C	Séquence : 3h
		Nombre de pièces : 1		Etabli par : BOUMZOU Mohammed Amokrane	
N° phase	Désignation des phases	Machine	Outil	Contrôle	Croquis
1	Contrôle de brut		Pied à coulisse	Visuel Pied à coulisse	
2	Tournage A/ Chariotage B/ Dressage C/ Alésage conique	Tour universel	Outil à charioter Outil à dresser Outil à aléser	Pied à coulisse Micromètre Tampon 10H7	
3	Perçage	Perceuse à colonne	Foret de $\varnothing 8$	Pied à coulisse	

Tableau 36- Gamme d'usinage du disque rotatif

IV.3.2- Réalisation

La réalisation des pièces de fixation du moteur a été faite en suivant les étapes citées dans les gammes de fabrication et en respectant les dimensions par des dessins normalisés. Nous les avons réalisés au niveau de notre département vu que tous l'outillage nécessaire est disponible. Tandis que la bague de transmission a été réalisée sur un tour à commande numérique au niveau de l'entreprise SNVI et le disque rotatif chez un atelier privé. Les figures qui suivent montrent les pièces réalisées.



Figure 119- Equerres du moteur

CHAPITRE V : Réalisation de la centrifugeuse



Figure 120- Plaque du moteur

La bague de transmission est une pièce très importante pour le bon fonctionnement de la machine et c'est pour cela que nous l'avons réalisé au niveau de l'SNVI usinage de précision avec rectification.

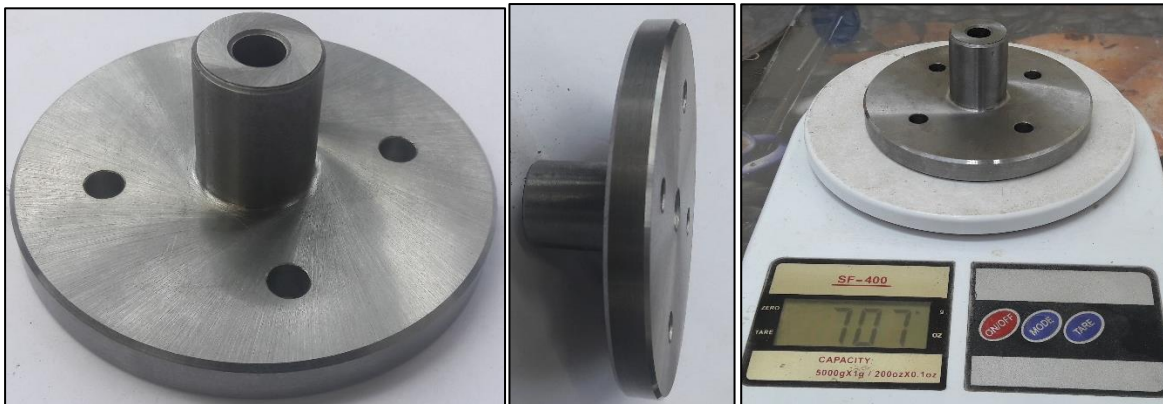


Figure 121- Bride de transmission

Le disque rotatif illustré sur la figure 122 a été réalisé grâce à l'aide d'un tourneur privé, car le diamètre du disque et sa forme ne peuvent pas être réalisés au département du génie mécanique.



Figure 122- Disque rotatif

CHAPITRE V : Réalisation de la centrifugeuse

La bride de transmission a été fixée avec l'axe du moteur par serrage grâce à une presse manuelle d'une capacité de 15 tonnes, comme le montre la figure 123.



Figure 123- Montage de la bride de transmission

IV.4- Vue globale de la machine

Après la réalisation de tous les éléments de la machine et des sous assemblages, on passe au montage de la centrifugeuse.

La figure 124 montre l'assemblage du fond de la chambre de travail, qui permettra la rotation du disque rotatif.



Figure 124- Assemblage-moteur

CHAPITRE V : Réalisation de la centrifugeuse

Ce dernier a été monté à l'intérieur de la chambre de travail comme montre la figure 125.



Figure 125- Fond de la chambre de travail

La figure suivante montre la vue finale de la chambre de travail avant de l'assembler avec la structure.



Figure 126- Vue finale de la chambre de travail

CHAPITRE V : Réalisation de la centrifugeuse

La chambre de travail se monte avec la structure en reposant sur deux paliers comme montre la figure 127.



Figure 127- la chambre de travail après montage

La figure suivante montre la vue finale de la machine conçue et réalisée et qui est prête pour le fonctionnement.



Figure 128- Vue finale de la centrifugeuse à fond tournant

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les gammes de fabrication, d'usinage et d'assemblage en suite quelques étapes de réalisation des éléments de chaque partie de la machine, en commençant par les éléments de la structure, de fixation de la chambre de travail et de fixation du moteur.

Et finalement nous avons fait une vue globale de la machine centrifugeuse.

Conclusion générale

Finalement nous sommes arrivés à concevoir et à réaliser la machine centrifugeuse à fond tournant, pouvant traiter par le procédé de tribofinition et en utilisant la technologie de la force centrifuge, des différentes pièces, surtout les pièces de formes géométriques très complexes, afin d'améliorer leurs caractéristiques géométriques, mécaniques, et métallurgiques de surface.

Ce modeste travail était d'un côté l'occasion de revoir et d'exploiter les notions théoriques et pratiques acquises tout le long de notre cursus universitaire au sein de notre prodigieuse spécialité. Et d'un autre côté, il nous a permis d'aborder et de comprendre de nouvelles techniques très intéressantes et très utilisées dans la mécanique moderne pour les traitements de surface et surtout la technique de tribofinition par centrifugeuses à fond tournant.

Pour réaliser ce travail, il a fallu passer par différentes étapes cruciales qui sont : l'étude et la compréhension du problème, la recherche des solutions adéquates en s'inspirant des divers techniques utilisées dans l'industrie mécanique, la recherche des matériaux adaptés à notre machine, le dimensionnement des différents éléments les plus sollicités et la conception d'un système qui assure le traitement de surface par la centrifugeuse à fond tournant.

Durant mon projet de fin d'étude et surtout pendant la phase de réalisation, j'ai affronté beaucoup de difficultés, qui nécessitent des solutions pratiques, ce qui m'a donné l'occasion d'acquérir une petite expérience dans ce domaine.

Enfin et après la réalisation de cette machine, il sera plus facile d'élaborer des études expérimentales telle que l'influence de la vitesse de rotation, des médias, et des additifs chimiques sur les caractéristiques mécaniques, géométriques et métallurgiques des pièces mécaniques à traiter, tout en faisant des tests de validation.

Références bibliographiques

- [1] GILLESPIE, Laroux. Mass Finishing Handbook. New York : Industrial Press Inc. 2006. 494p. Sciences et techniques de l'ingénieur. ISBN 0-8311-3257-4.
- [2] BABICHEV, Anatoly Prokofievich. Bases technologies de vibrations. 2nd Edition. Russie : Beshun. 2008. 676p. Sciences et techniques de l'ingénieur. ISBN 978-5-7890-0472-2.
- [3] ASHEBY, M. SHERCLIFF, H. et CEBON, D. Matériaux : ingénierie, science, procédé et conception. PPUR. 2010. 700p. ISBN 2889150259.
- [4] GEORGES, Jean-Marie. Frottement, usure et lubrification : La tribologie ou science des surfaces. CRNS Editions. 2000. 424p. Sciences et techniques de l'ingénieur. ISBN 2-212-05823-3.
- [5] BRUNETIERE, Noël. Introduction à la TRIBOLOGIE [en ligne]. France : Futuroscope, 2016. [Consulté le 20 avril 2019]. Disponible sur : <http://blogs.univ-poitiers.fr/noelbrunetiere/files/2015/12/tribologie_brunetiere_2016.pdf>
- [6] I.HUTCHINGS, P.SHIPWAY. Tribology : Friction and Wear of Engineering Materials. 2nd Edition. Elsevier Science. 2017. 412p. Sciences et techniques de l'ingénieur. ISBN : 978-0-08-100910-9.
- [7] TAYLOR, John Robert. Classical Mechanics. USA : University Science Books. 2005. 786p. Physique. ISBN 1-891389-22-X.
- [8] CHEVALIER, André. Guide du dessinateur industriel. Paris : HACHETTE Technique. 2004. 336p. Sciences et techniques de l'ingénieur. ISBN 2-01-16-8831-0.
- [9] KANJER, Armand. De l'efficacité des procédés SMAT et de choc laser dans l'amélioration de la tenue à l'oxydation haute température d'alliages de titane. 261p. Thèse de doctorat : Chimie physique : Université de Bourgogne Franche-Comté France : 2017.
- [10] RENAUD, Pierre. Modélisation numérique du grenailage des pièces initialement cémentées ou carbonitrurées. 215p. Thèse de doctorat : Mécanique et Matériaux : l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ParisTech : 2011.
- [11] Le QUILLIEC, Guénaél. Application du martelage à haute fréquence à l'optimisation de la maintenance des ouvrages et des structures soudées. 150p. Thèse de doctorat : Génie Mécanique : École Centrale de Nantes France : 2011.
- [12] MARRAY, Tarek. Carbonituration basse pression d'aciers et de pièces obtenues par la technologie MIM. 143p. Thèse de doctorat : Mécanique et Matériaux : École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Paris : 2012.
- [13] MOULS, Benjamin. Etude et développement de nouveaux traitements de surface sur alliage de magnésium Elektron 21. 139p. Thèse de doctorat : Science et Génie des Matériaux : Université Paul Sabatier Toulouse France : 2014.
- [14] FALLOT, Guillaume. Rôle du carbone lors de la nitruration d'aciers de construction et influence sur les propriétés mécaniques. 136p. Thèse de doctorat : Traitement Thermo-chimique : École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Paris : 2015.

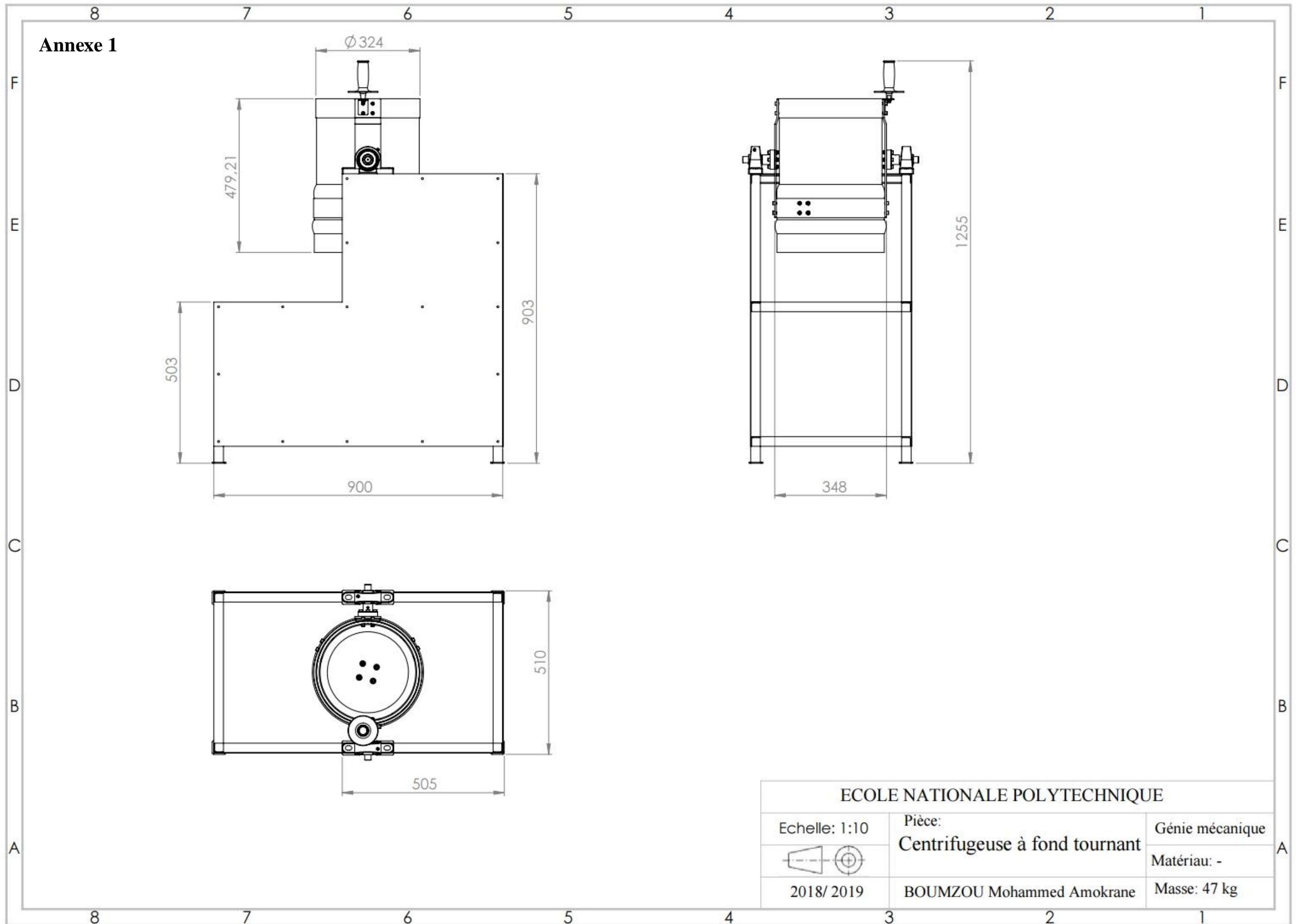
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [15] DEGRE, Fabien. Prédiction numérique des caractéristiques d'une pièce traitée par galetage : Application au secteur du décolletage. 134p. Thèse de doctorat : Matériaux : Université de Grenoble : 2011.
- [16] LAOUAR, Lakhdar. Traitement mécanique de surface par brunissage des aciers XC48 et XC18 : Optimisation et caractérisation. 130p. Thèse de doctorat : Génie Mécanique : Université Badji Mokhtar Annaba : 2007.
- [17] ROZHNEKO, Oksana Anatolyevna. Optimisation du processus de traitement centrifuge rotatif au moyen d'abrasif. 119p. Thèse de doctorat : Mécanique : Université technique Don State Russie : 2006.
- [18] BENDALI, Younes et AKLIL, Oussama. Conception et réalisation d'un vibreur linéaire, mémoire de fin d'études. 117p. Projet de fin d'étude : Génie Mécanique : Ecole Nationale Polytechnique : 2018.
- [19] KHERBOUCHE, Nedjma et MENDIL, Rabah. Étude, conception et réalisation d'un outil de galetage et son effet sur la rugosité de surface d'un acier X8CrNiS18-9. 108p. Mémoire de Master : Construction Mécanique : Université M'hamed Bougara Boumerdes : 2017.
- [20] BEDDERI, Serhane. Amélioration de la qualité de surface par le procédé de tribofinition. 102p. Mémoire de projet de fin d'études : Génie Mécanique : École Nationale Polytechnique Alger : 2009.
- [21] BENSALÉM, Mohamed Abderrahmane. Conception sous Solidworks d'un vibreur circulaire. 99p. Mémoire de projet de fin d'études : Génie Mécanique : École Nationale Polytechnique Alger : 2015.
- [22] TOURAB, M. Influence des paramètres du régime de galetage sur les fonctions finales de rugosités et de dureté de surface des aciers. 98p. Mémoire de Magister : Génie Mécanique : Université Badji Mokhtar Annaba : 2003.
- [23] ATHMANI, Moussa. Amélioration des propriétés de surfaces d'un acier à outils de travail à chaud par traitement thermique et thermochimiques (cémentation). 92p. Mémoire de MAGISTER : Génie des Matériaux : Université Badji Mokhtar Annaba : 2011.
- [24] BOUAZIZ, Mohamed. Ajustements. Cours de métrologie. Ecole Nationale Polytechnique. 2016.
- [25] DUBOIS, P. Théorie d'Hertz. Cours de sciences de l'ingénieur. CPGE PTSI/PT - Sciences Industrielles de l'Ingénieur. 2017.
- [26] ARFAOUI A, CHAKER M. Traitements mécaniques et traitements thermochimiques, Cours de matériaux métalliques. ISET Kasserine Tunisie. 2010.
- [27] ASSOCIATION DE TRAITEMENT THERMIQUE ET DE TRAITEMENT DE SURFACE. A3TS [en ligne]. [Consulté le 20 mars 2019]. Disponible sur : <https://www.a3ts.org/actualite/commissions-techniques/fiches-techniques-traitement-surface/chromatation/>.
- [28] ATELIER DE TRAITEMENT DES METAUX. SONEL [en ligne]. [Consulté le 21 mars 2019]. Disponible sur : <https://www.sonel.fr/savoir-faire/chromatation-sur-aluminium/>.

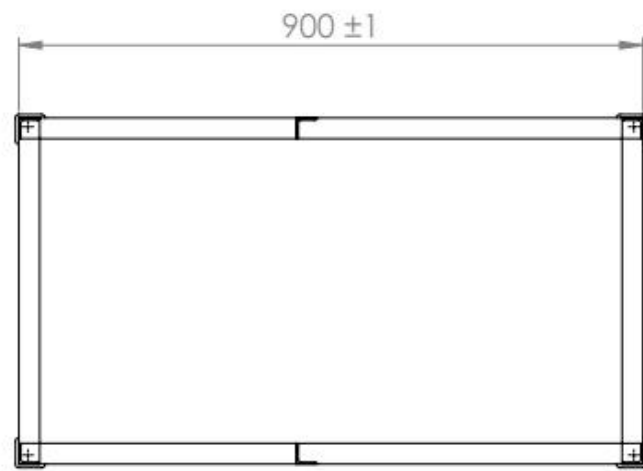
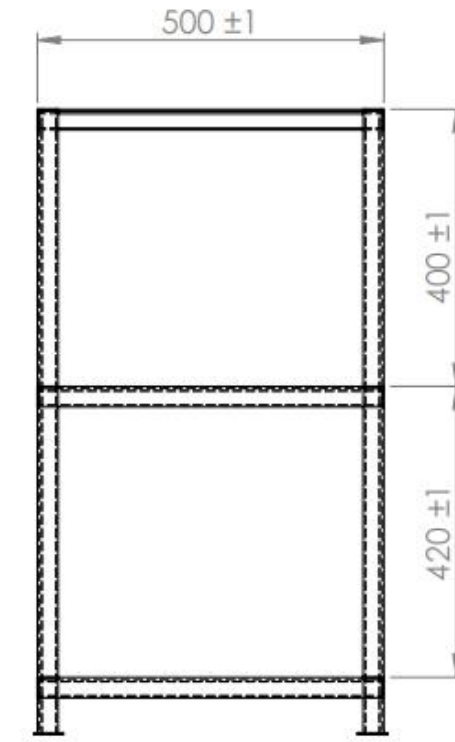
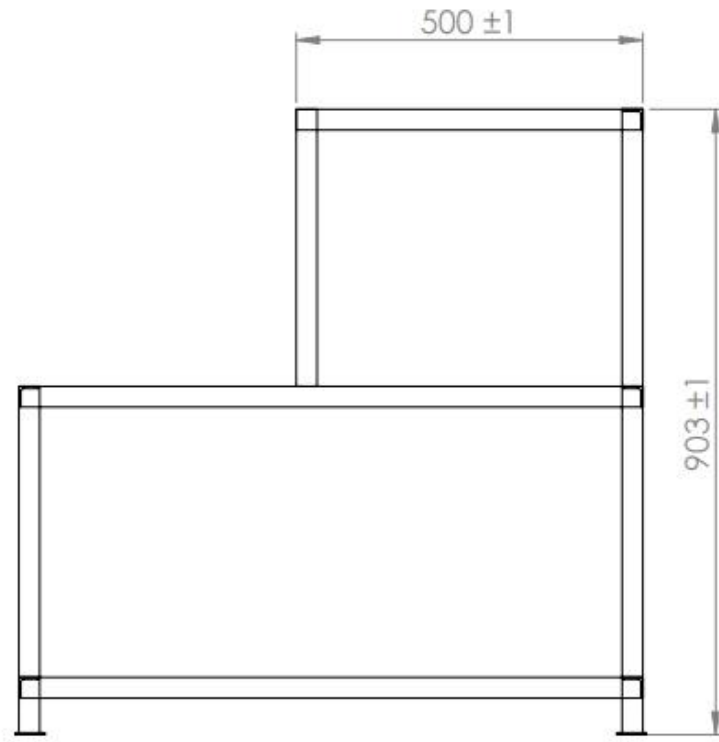
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [29] FABRICANT DES EQUIPEMENTS DE ZINGAGE ET DE PHOSPHATATION. RIVESTCOR [en ligne]. [Consulté le 22 mars 2019]. Disponible sur : <<http://www.rivestcor.com/fra-phosphatation-au-manganese/zingage-electrolytique.htm>>.
- [30] FABRICANT EUROPEEN DE HAYONS ELEVATEURS. DHOLLANDIA [en ligne]. [Consulté le 30 mars 2019]. Disponible sur : <<http://www.dhollandia.fr/FR/fr/79/Finition-ZINC-ne-donner-aucune-chance-la-corrosion>>.
- [31] ATELIER DE TREMPE REESE. HAERTEREI REESE. [en ligne]. [Consulté le 21 mars 2019]. Disponible sur : <<https://www.haerterei.com/fr/procedes/cementation/>>.
- [32] TECHNI-CONTACT. TECHNI-CONTACT [en ligne]. [Consulté le 25 avril 2019]. Disponible sur : <<https://www.techni-contact.com/produits/757-8990496-grenailleuse-a-turbine-pour-marbre.html>>.
- [33] FABRICANT MECANIQUE ET INDUSTRIEL. KEHR [en ligne]. [Consulté le 21 mars 2019]. Disponible sur : <<http://kehr-sarl.fr/mecanique-generale>>.
- [34] JOHO, P. Les quatre cas de frottement, cours [en ligne]. [Consulté le 15 avril 2019]. Disponible sur : <<http://joho.p.free.fr/EC/COURS%20DOC/Lubrification/LES%20QUATRE%20CAS%20DU%20FROTTEMENT.pdf>>
- [35] FABRICANT D'EQUIPEMENTS DE TRIBOFINITION. ABCSWISSTECH [en ligne]. [Consulté le 2 mai 2019]. Disponible sur : <<https://www.abcswisstech.com/>>.
- [36] FABRICANT D'EQUIPEMENTS DE TRIBOFINITION. WIELAND-OERTL [en ligne]. [Consulté le 5 mai 2019]. Disponible sur : <<https://www.wieland-oertli.ch/fr/walther-trowal-gleitschleiftechnik/verfahrensmittel/>>.
- [37] FABRICANT D'EQUIPEMENTS DE TRIBOFINITION. ROSLER [en ligne]. [Consulté le 7 mai 2019]. Disponible sur : <<https://de.rosler.com/en-en/finishing-processes/>>.
- [38] FABRICANT D'EQUIPEMENTS PHARMACEUTIQUE, MEDICALE ET AGROALIMENTAIRE. STREB & WEIL [en ligne]. [Consulté le 10 mai 2019]. Disponible sur : <<https://www.strebweil.com/view/savoir-faire.php?page=2.2.3>>.

Annexes

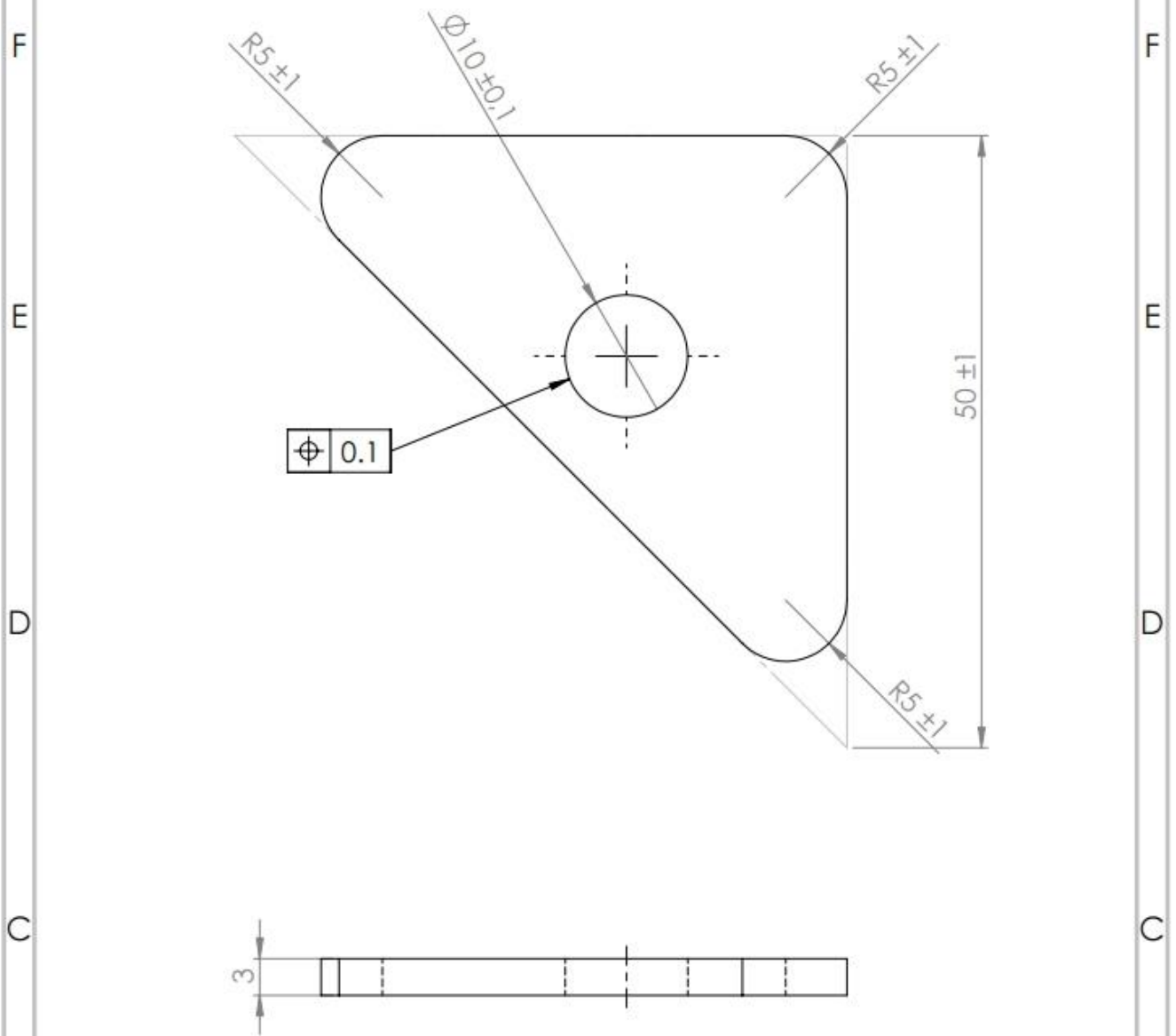


Annexe 2



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE		
Echelle: 1:10	Pièce:	Génie mécanique
	Structure	Matériau: Acier S185
2018/ 2019	BOUMZOU Mohammed Amokrane	Masse: 14 kg

Annexe 3



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle: 2:1

Pièce:

Génie mécanique



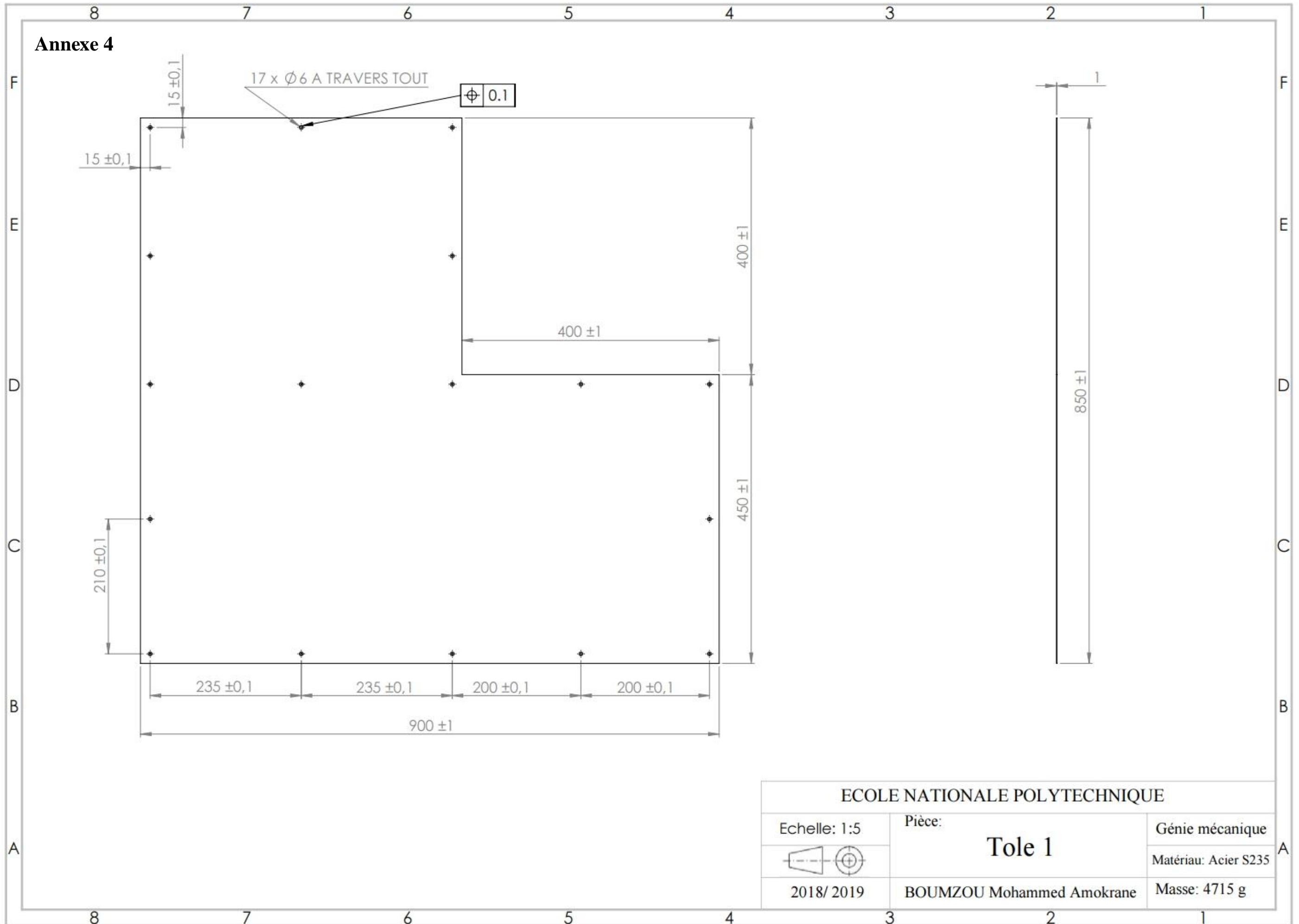
base

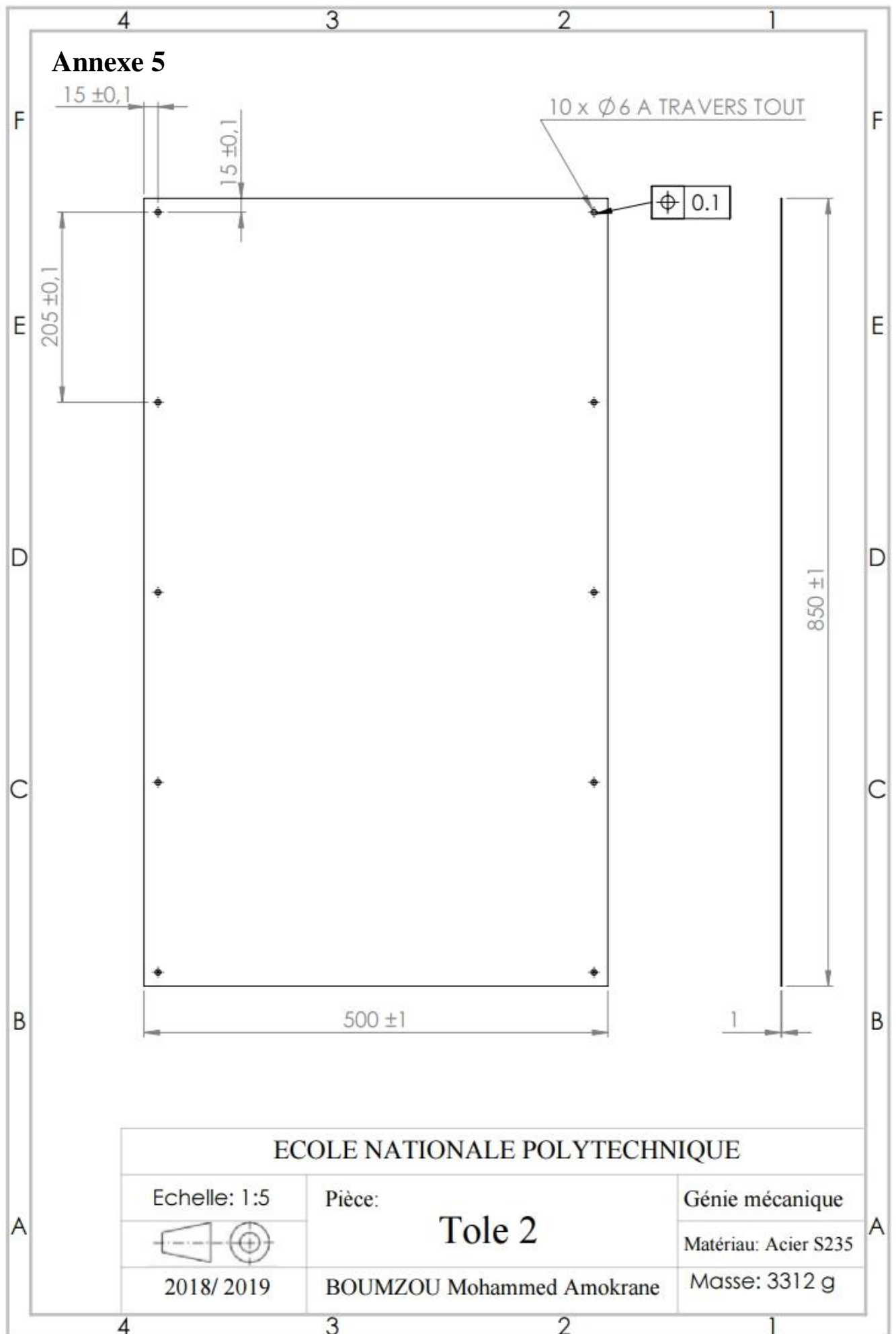
Matériau: Acier S235

2018/ 2019

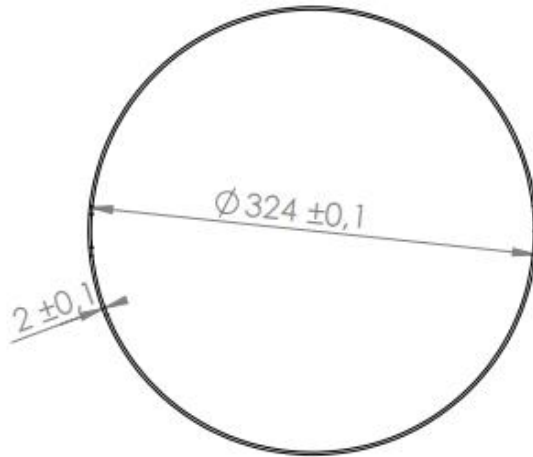
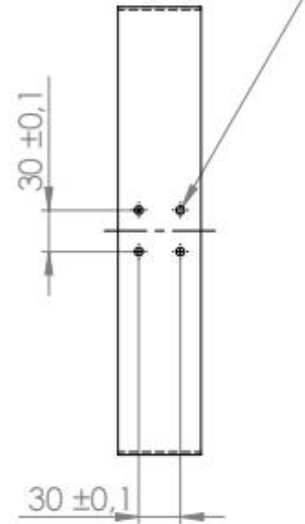
BOUMZOU Mohammed Amokrane

Masse: 26 g





Annexe 6

4 x $\varnothing 6$ A TRAVERS TOUT

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle: 1:5

Pièce:

Génie mécanique

**Ceinture S**

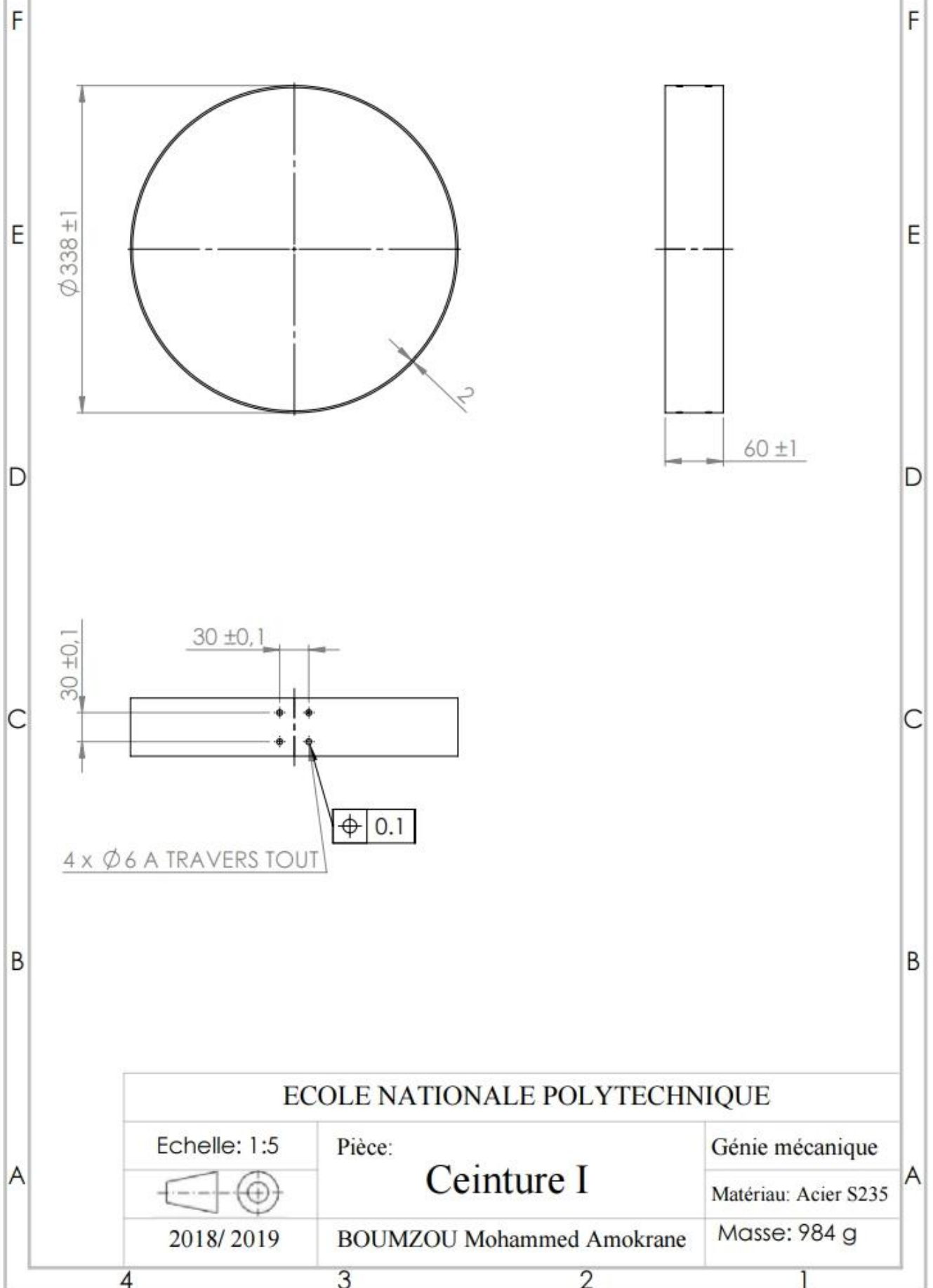
Matériau: Acier S235

2018/ 2019

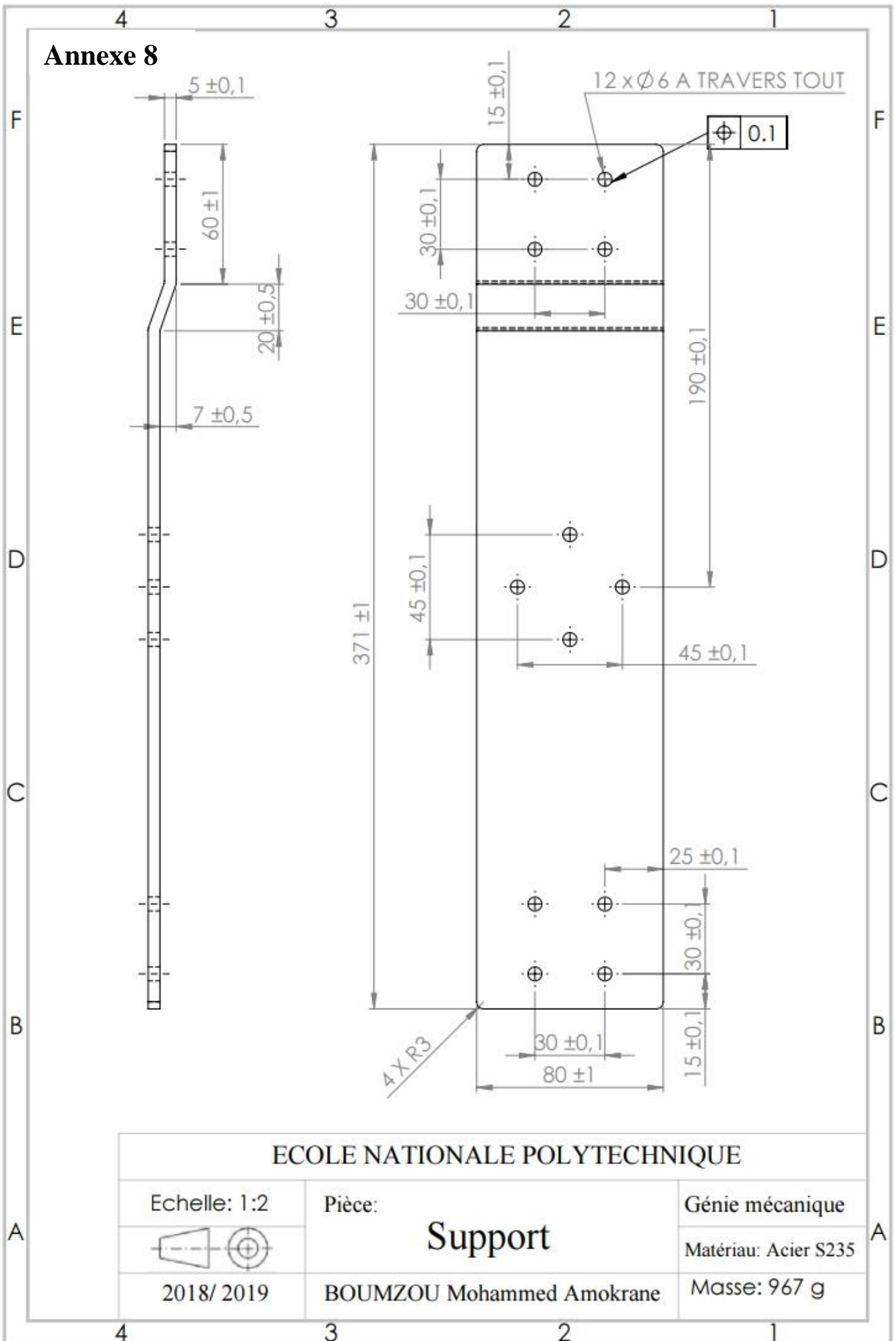
BOUMZOU Mohammed Amokrane

Masse: 943 g

Annexe 7



Annexe 8



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle: 1:2

Pièce:

Génie mécanique



Support

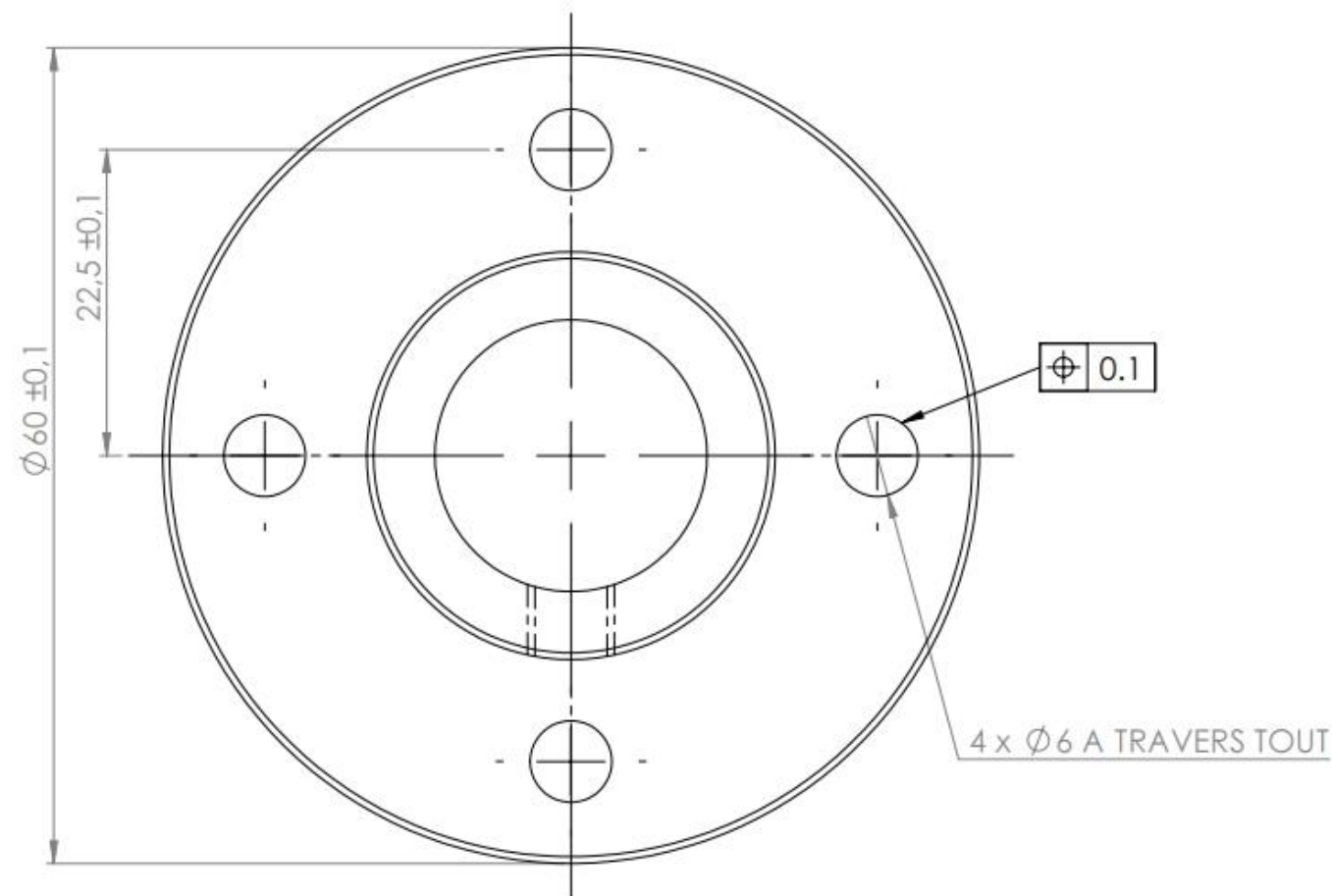
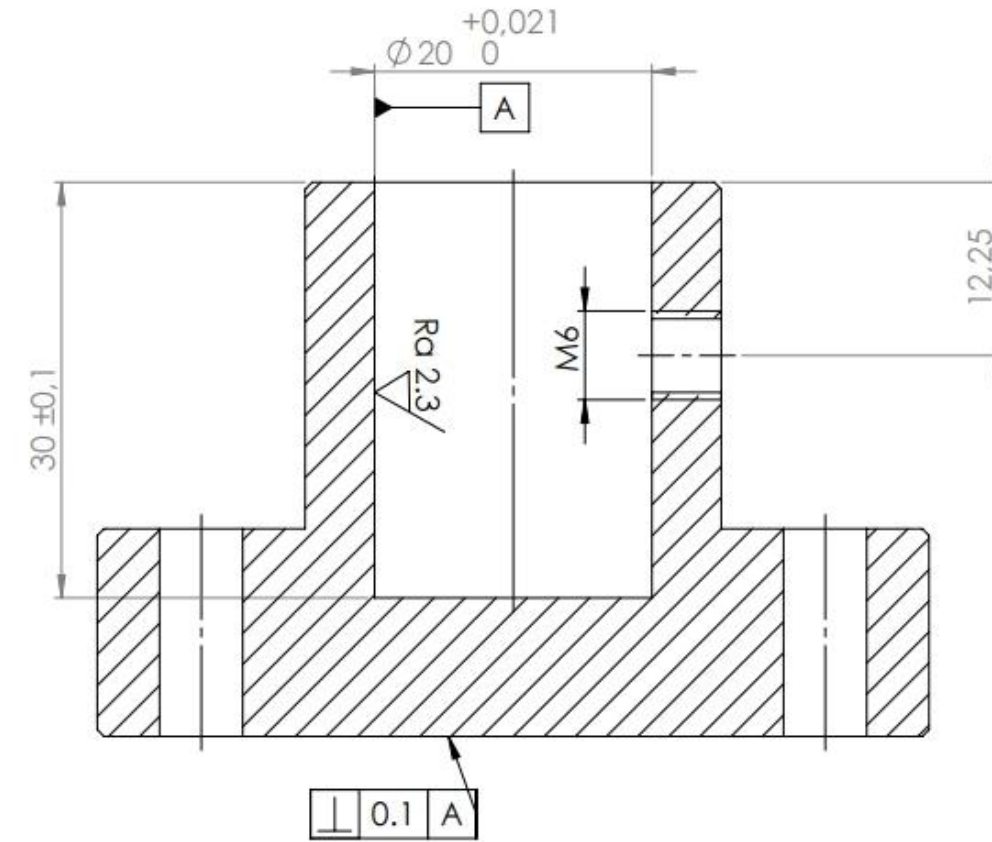
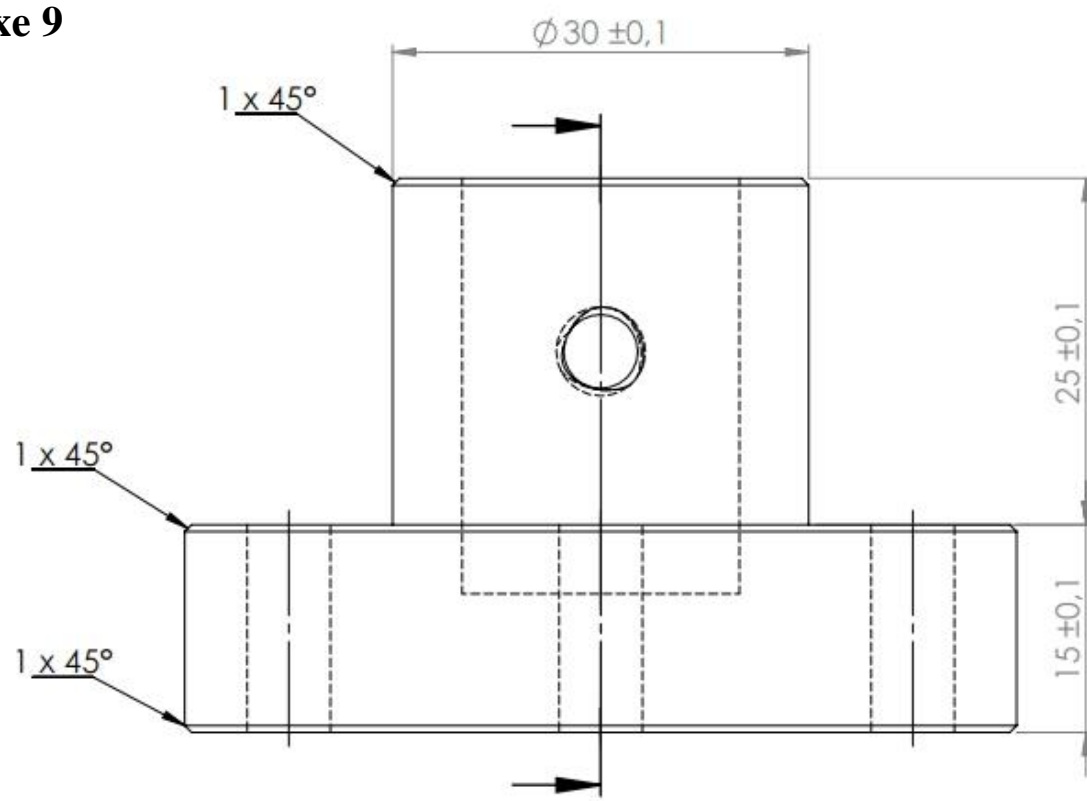
Matériau: Acier S235


2018/ 2019

BOUMZOU Mohammed Amokrane

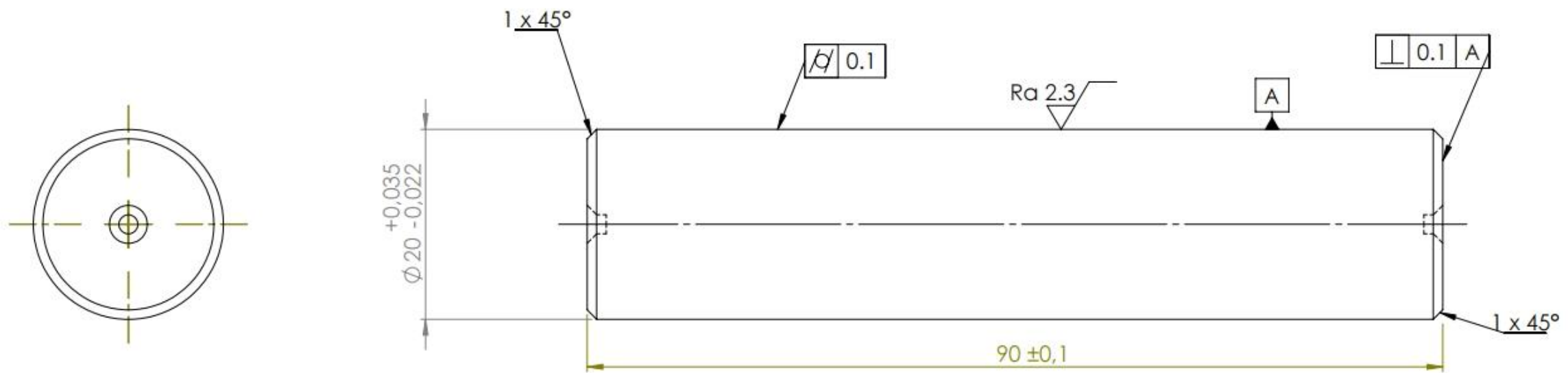
Masse: 967 g

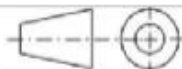
Annexe 9



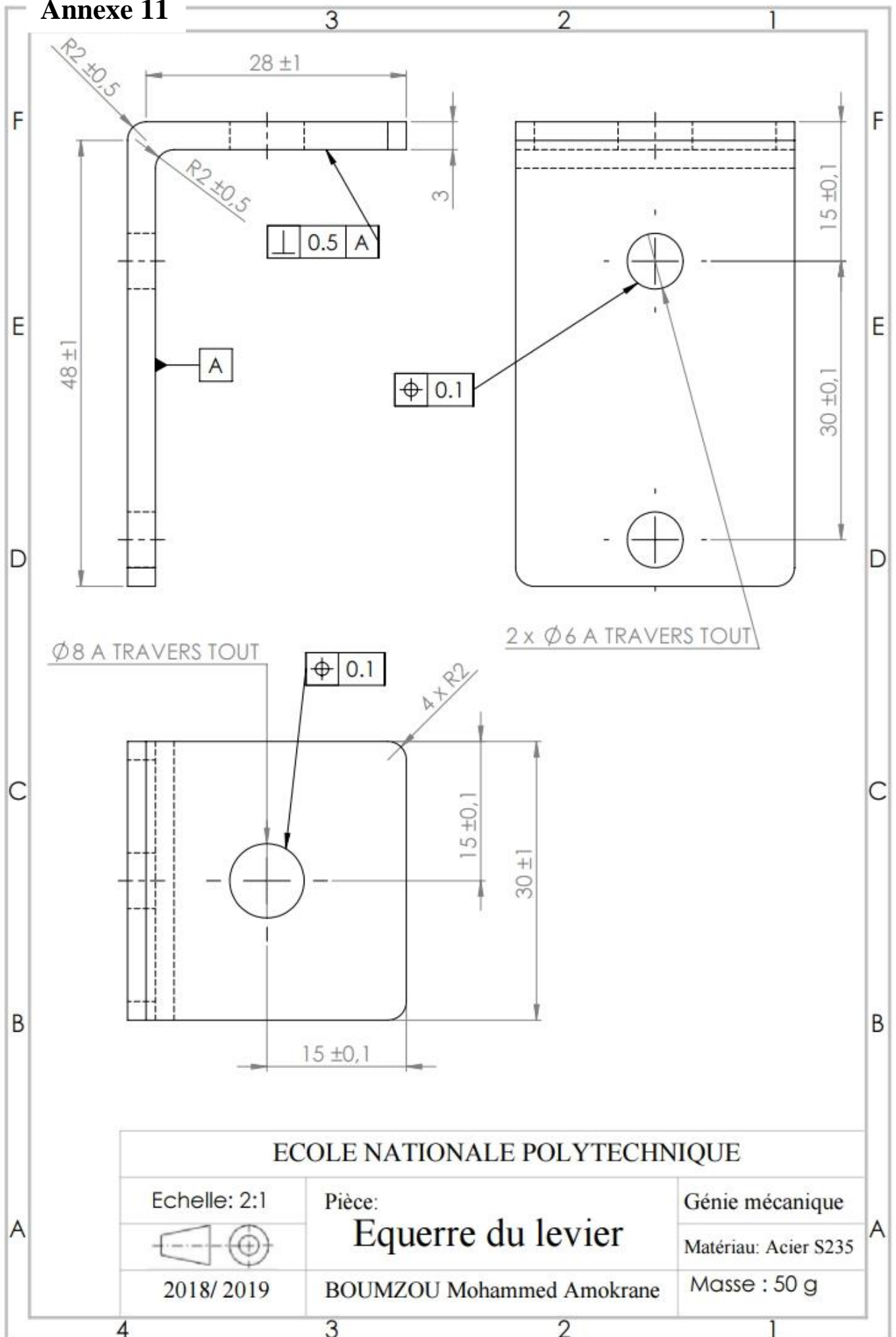
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE		
Echelle: 2:1	Pièce:	Génie mécanique
	Bride	Matériau: Acier S335
2018/2019	BOUMZOU Mohammed Amokrane	Masse : 320 g

Annexe 10



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE		
Echelle: 2:1	Pièce: Axe	Génie mécanique
		Matériau: Acier S335
2018/ 2019	BOUMZOU Mohammed Amokrane	Masse: 167 g

Annexe 11



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle: 2:1

Pièce:

Génie mécanique



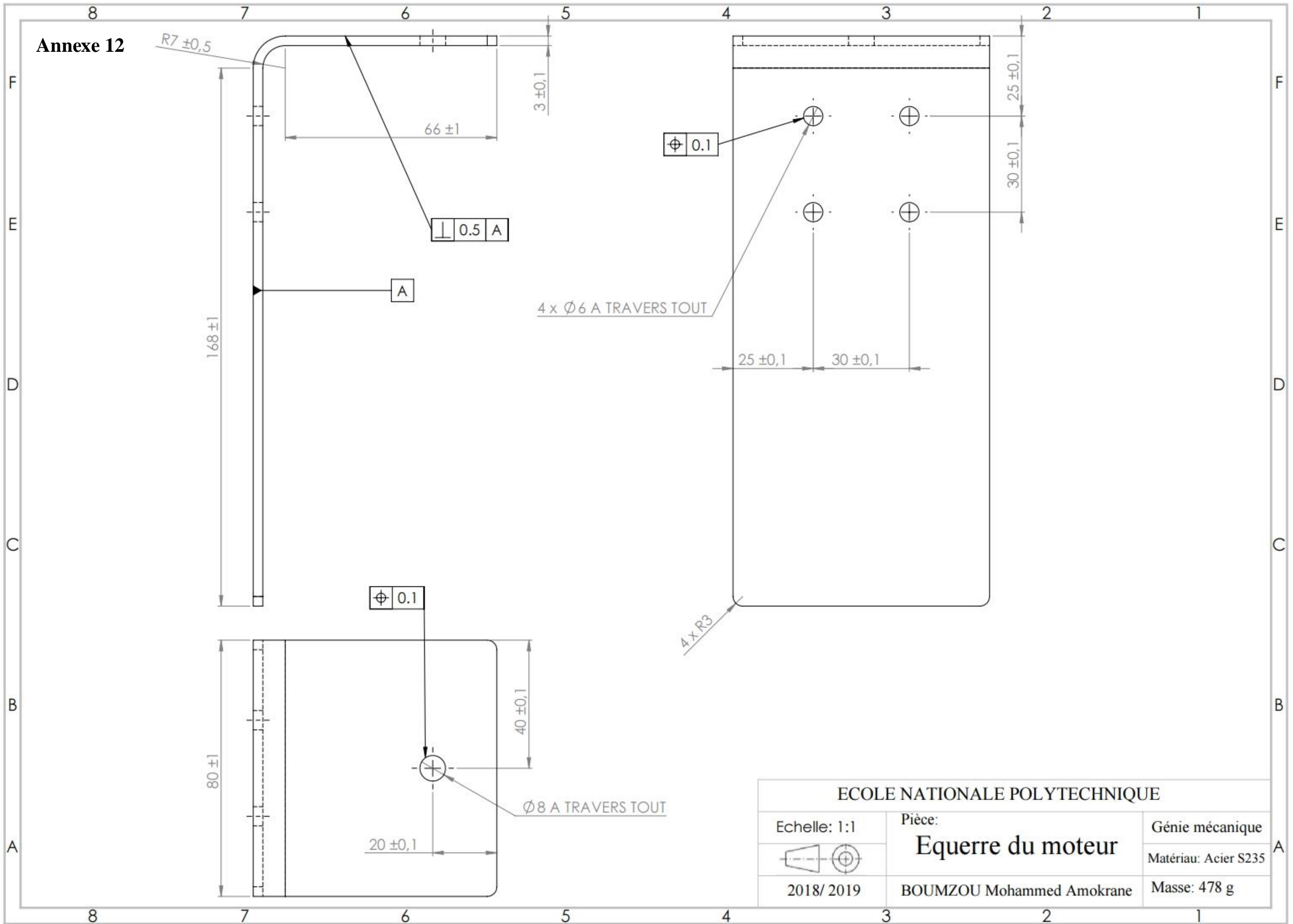
Equerre du levier

Matériau: Acier S235

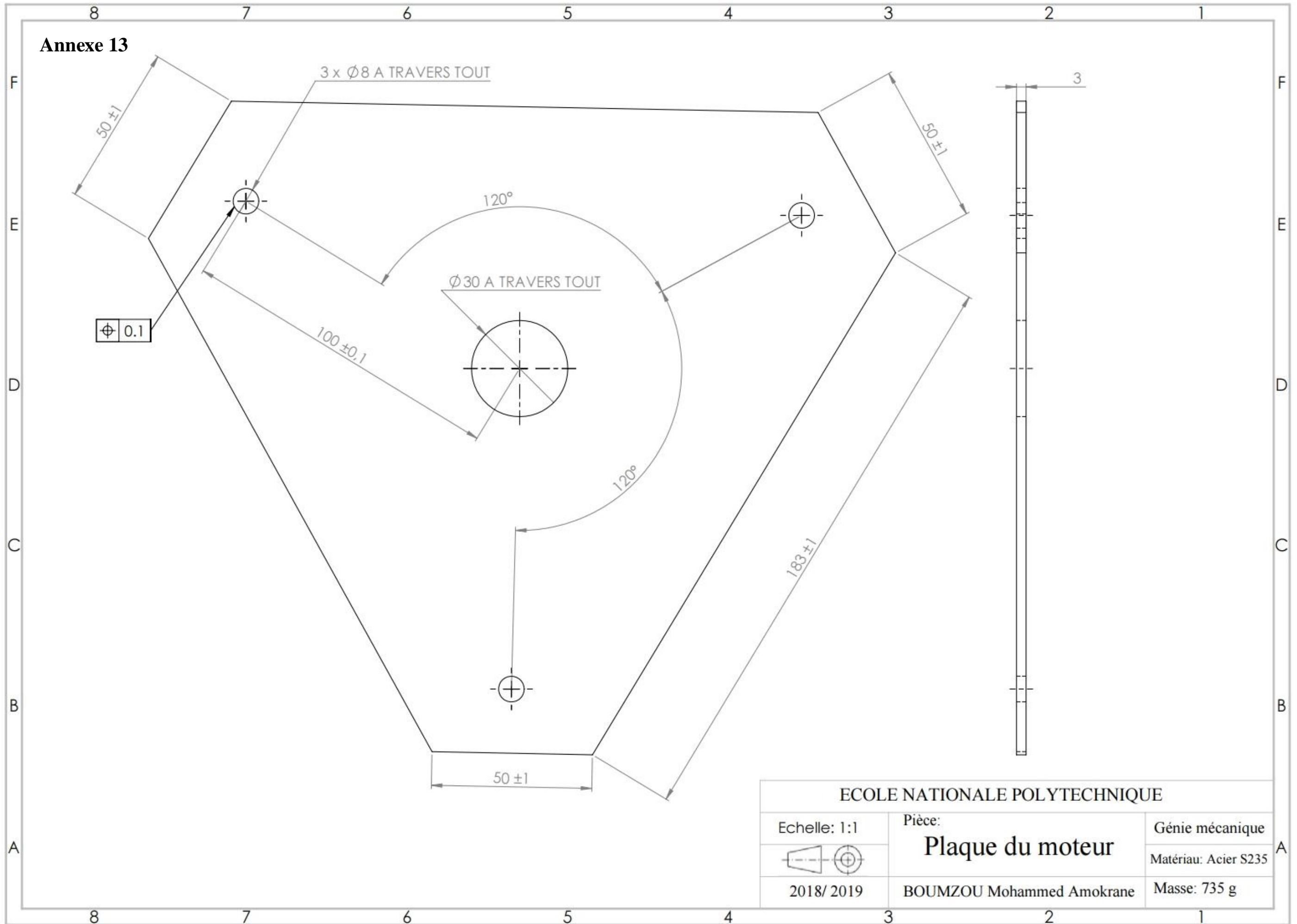
2018/2019

BOUMZOU Mohammed Amokrane

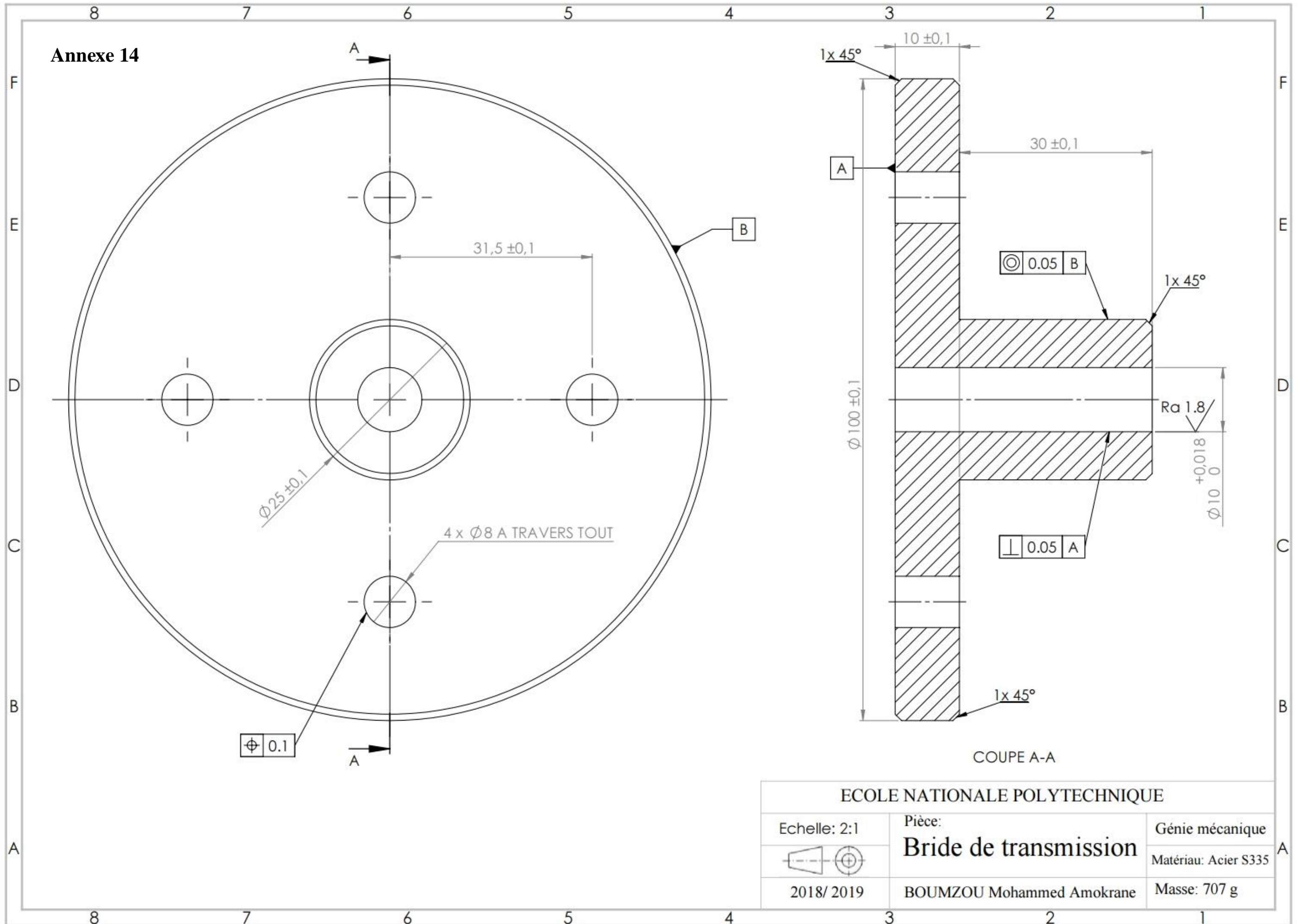
Masse : 50 g



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE		
Echelle: 1:1	Pièce:	Génie mécanique
	Equerre du moteur	Matériau: Acier S235
2018/ 2019	BOUMZOU Mohammed Amokrane	Masse: 478 g



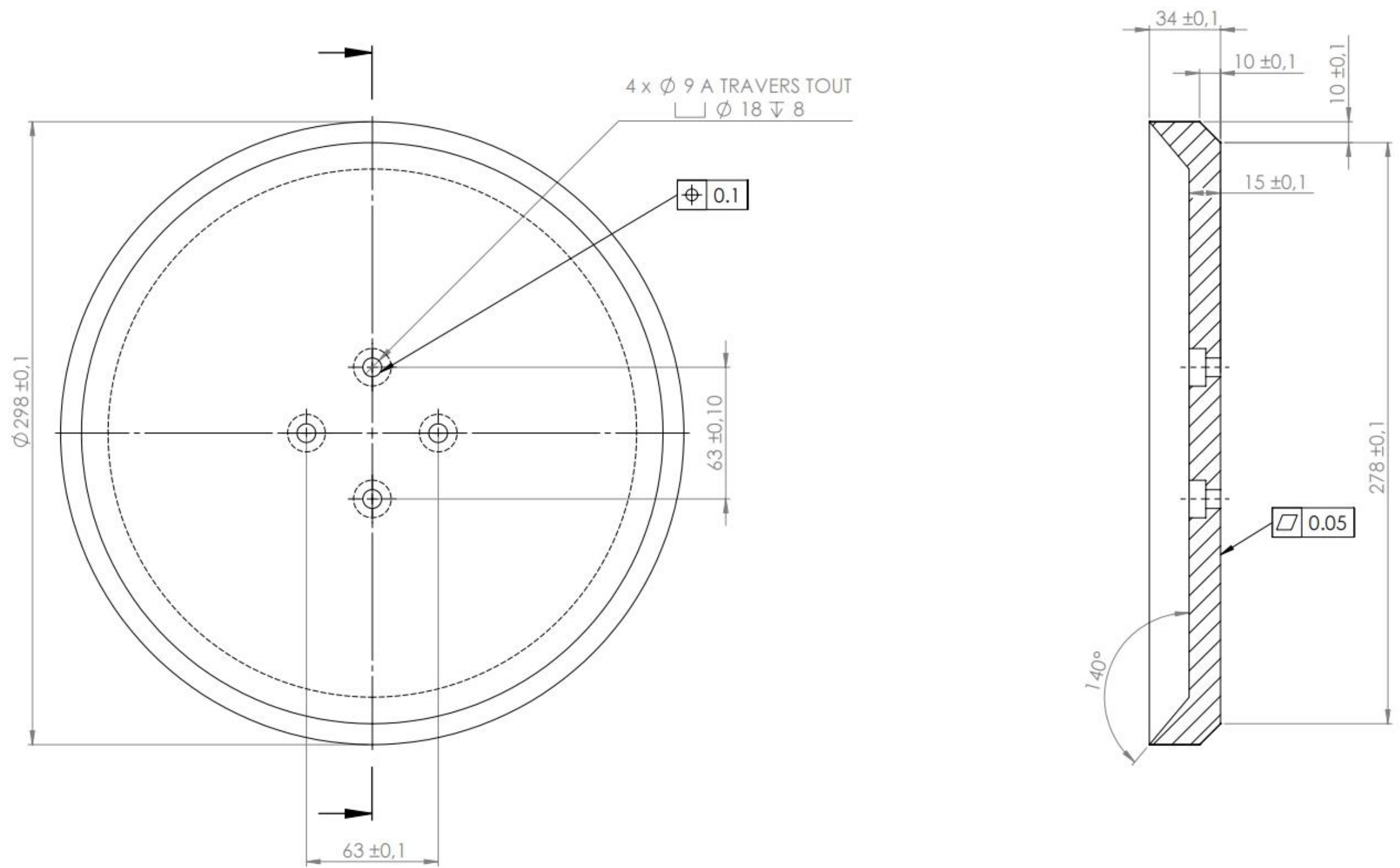
Annexe 14




ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle: 2:1	Pièce:	Génie mécanique
	Bride de transmission	Matériau: Acier S335
2018/ 2019	BOUMZOU Mohammed Amokrane	Masse: 707 g

Annexe 15



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE		
Echelle: 1:2	Pièce:	Génie mécanique
	Disque rotatif	Matériau: Polyacétal
2018/ 2019	BOUMZOU Mohammed Amokrane	Masse: 1666 g