

*République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et
De la Recherche Scientifique Université M'hamed
Bougara Boumerdes*



*Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Mécanique*

MEMOIRE

*Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER
Option : Construction Mécanique*

*Étude, conception et réalisation d'un outil
de galetage et son effet sur la rugosité de
surface d'un acier X8CrNiS18-9*

Réalisé par :

- *KHERBOUCHE Nedjma*
- *MENDIL Rabah*

Encadré par : M' M.TOURAB

**Année universitaire
2016-2017**



Remerciement

Nous tenons en premier lieu à remercier notre Allah pour son aide qu'il nous a accordé afin de mener notre travail à terme.

*Nous remercions notre promoteur « **Mr. TOURAB** » enseignant du département de génie mécanique(FSI) Boumerdes pour avoir bien voulu encadrer notre projet, pour son aide, ses conseils et ses suggestions.*

Nous remercions très vivement le colonel D.MENSSOURI, chef département mathématique et technologique à l'école supérieur navale, de temanfouste, pour sa disponibilité, ses orientations ainsi que pour ses conseils.

Je remercie très vivement madame HADIALI, enseignant du département de génie mécanique(FSI) à l'université de Boumerdes, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de participer au jury.

Je voudrais aussi remercier M^{rs}. CHIKH, BELHADAF et SAMOUD enseignants du département de génie mécanique(FSI) Boumerdes, pour leurs aides et leurs encouragements.



Mes remerciements vont également à tous les membres du service laboratoire, hôtel des monnaies de la banque d'Algérie, et particulièrement Monsieur S. MAHFOUF qui par sa compétence technique m'a permis de réaliser certains travaux,

Mes remerciements vont également aux agents techniques de service rouleaux, M^{rs}. RACHID, SAMIR, HAKIM, MAHMOUD pour avoir voulu m'aider à réaliser certains essais expérimentaux au sein de l'institut.

Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

Enfin je finirai nos remerciements par un grand merci à nos parents, nos sœurs et nos frères, nos amis qui nous ont soutenu et ont su trouver les mots ou simplement être là dans les moments de doute et d'hésitation.

MERCI à tous ...





Dédicaces

Je dédie ce mémoire:

À ma très chère mère qui a été la lumière de ma vie

À ma chère femme

À mes enfants Houssam et Khalil

À mes sœurs et mon frère qui m'ont encouragé et soutenu moralement.

À toute ma famille

À ma binôme, N.KHERBOUCHE et toute sa famille

À mes amis : MOURAD, MOHAMED, HAKO, SAID.....etc.

*À mes enseignants durant toutes les années d'études de DEUA jusqu'au
MASTER sur tout Mr. CHIKH.*



MENDIL Rabah



Dédicaces

A ma très chère mère, mon père,

A mes frères, A mes sœurs

A toute ma famille

Qui ont été toujours à mes cotés

A mon binôme M. Rabah et toute sa famille

A tous mes amis, (Sofiane, Rafik....)

Je dédié ce modeste travail



Nedjma KHERBOUCHE

TABLEAU DES MATIERES

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des nomenclatures

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : Généralité sur les traitements mécaniques

I.1 Introduction.....	3
I.2 Propriétés mécaniques des métaux	3
I.2.1 Elasticité et plasticité.....	3
I.2.2 Résistance mécanique	4
I.2.3 Rigidité.....	4
I.2.4 Ductilité.....	5
I.2.5 Ténacité	5
I.2.6 Résistance à la fatigue	5
I.2.7 Dureté.....	5
I.2.7.1 Dureté et résistance en traction.....	5
I.2.7.2 Types d'essais	6
I.3 Qualité physico-géométrique	10
I.3.1 La surface	10
I.3.2 L'état structural et physique	10
I.3.3 Topographie	11
I.3.3.1 Définition.....	11
I.3.3.2 Importance de la topographie	12
I.3.3.3 Paramètres de rugosité.....	13
I.4 Traitement mécanique de surface par galetage.....	14
I.4.1 Introduction	14
I.4.2 Définition et principe	15
I.4.3 Différents types de galetage	16
I.4.4 Avantages du galetage.....	17
I.4.5 Effet du galetage sur l'état de surface	17
I.5 Conclusion	18

CHAPITRE II: Etude et Conception de l'outil de galetage

II.1 Introduction	19
II.2 Description de L'outil.....	19
II.2 .1 Fonction de l 'outil.....	19
II.2.2 Caractéristiques.....	19
II.2.3 Réglage de l'outil.....	19
II.2.4 Choix de la matière des pièces.....	19
II.3 Conception assisté par ordinateur (CAO).....	20
II.3.1 Définition de la CAO	20
II.3.2 Avantages de la CAO.....	21
II.3.3 Mode d'utilisation.....	21
II.3.4 Description générale de SolidWorks	22
II.3.4.1 Définition de SolidWorks.....	22
II.3.4.2 L'écran graphique de SolidWorks.....	22
II.4 Etudes de résistance des matériaux de l'outil de Galetage	23
II.4.1 Introduction.....	23
II.4.2 Ressorts de compression hélicoïdale	23
II.4.2.1 Définition	23
II.4.2.2 Fonction.....	24
II.4.2.3 Matériau	24
II.4.2.4 Paramètres physiques	24
II.4.2.5 Calcul statique	26
II.4.2.6 Calculs dynamique	28
II.5 Etude de réaction des pièces de l'outil	31
II.6 Etude d'assemblages.....	32
II.6.1 Présentation.....	32
II.6.2 Caractéristiques géométriques	32
II.6.3 Géométrie d'une vis :.....	32
II.6.4 Relation entre la force de traction et le couple de serrage	35
II.6.5 Calcul des assemblages par filetage	38
II.7 Bille et roulement	42
II.7.1 Bille.....	42
II.7.1.1 Définition et principe	42

II.7.1.2 Calcul de résistance	44
II.7.2 Roulement	46
II.7.2.1 Introduction	46
II.7.2.2 Calcul de résistance	47
II.8 Emmanchement mandrin support – corps	50
II.9 Conclusion	51

CHAPITRE III: Réalisation de l'outil de galetage

III.1 Introduction	52
III.2 Définition d'un travail unitaire.....	52
III.3 Etude de dessin de définition	52
III.4 L'inventaire des différentes surfaces à usiner	53
III.5 Graphe orient des conditions du BE.....	53
III.6 Détermination des opérations élémentaires.....	53
III.7 Qualité dimensionnelle.....	53
III.8 Etat de surface	54
III.9 Rigidité de la pièce	54
III.10 Contrat de phase	54
III.11 Conclusion.....	82

CHAPITRE IV: Effet du galetage sur la rugosité d'un acier X8CrNiS18-9

IV.1 Plans d'expériences.....	83
IV.1.1 Introduction	83
IV.1.2 Définition.....	84
IV.1.3 Espace expérimental.....	85
IV.2 Modélisation par les plans d'expériences	86
IV.2.1 Matrice d'expériences	88
IV.2.2 Matrice des effets	88
IV.2.3 Calcul des coefficients du modèle.....	89
IV.3 Plans factoriels complets à deux niveaux (2^k)	91
IV.3.1 Définition.....	91
IV.3.2 Avantages des plans factoriels complets	91
IV.4 Analyse de la variance « ANOVA »	92
IV.5 Equipements utilisés	94

IV.5.1 Matériau.....	94
IV.5.1.1 Composition chimique et microstructure.....	94
IV.5.1.2 Caractéristiques mécaniques.....	94
IV.5.2 Machine-outil	95
IV.5.3 Description du dispositif de galetage	95
IV.5.4 Préparation des éprouvettes.....	96
IV.5.5 Appareil de mesure de Rugosité.....	97
IV.6 Analyse et discussion des résultats	98
IV.6.1 Détermination et vérification du modèle.....	98
IV.6.2 Analyse du modèle	101
IV.6.3 Effet de la profondeur sur la rugosité de surface.....	102
IV.6.4 Effet du nombre de passes de l’outil sur la rugosité de surface	103
IV.6.5 Effet de la vitesse de rotation sur la rugosité de surface	103
IV.6.6 Effet de l’avance de galetage sur la rugosité de surface.....	104
IV.6.7 Effet de l’interaction du nombre de passes et l’avance de galetage sur la rugosité	105
IV.6.8 Effet de l’interaction de la vitesse de rotation et l’avance de galetage sur la rugosité.....	106
IV.7 Conclusion	107
<u>CHAPITRE V: CONCLUSION GENERALE</u>	108

ANNEXES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Résumé

Le galetage à bille est un procédé par déformation plastique superficielle permettant ainsi un traitement mécanique par formage à froid des surfaces des pièces mécaniques, il a été utilisé progressivement comme une opération de finition qui donne des avantages supplémentaires tels que l'augmentation de la dureté de surface, la résistance à la fatigue, la résistance à l'usure et la génération des contraintes résiduelles de compression. Le but de cette recherche est de faire une étude, une conception, une réalisation d'un outil de galetage à bille ainsi que sa validation par l'étude de l'influence de ses paramètres à savoir : profondeur de galetage, vitesse de rotation , avance et nombre de passes de l'outil sur la rugosité de surface (Ra) d'un acier X8CrNiS18-9 par l'application d'un plan d'expérience factoriel complet basé sur une étude statistique afin de déterminer un modèle mathématique liant la rugosité de surface en fonction des quatre paramètres du régime de galetage à bille. Les résultats expérimentaux ont révélé qu'une amélioration de la rugosité environ 65 % a été obtenue, ce qui a permis de valider notre objectif.

Mots clés : Acier X8CrNiS18-9 ; galetage à bille ; rugosité ; plan d'expérience.

الخلاصة

التدميك بواسطة كرة فولاذية هو عملية التشوه اللدن للطبقات السطحية للمادة و الذي يسمح بتحسين خصائصها عن طريق إعادة التشكل على البارد للقطع الميكانيكية. يستخدم تدريجيا كأخر عملية تحسينية لإعطاء فوائد إضافية للمادة كالزيادة في صلادة السطح ، المقاومة عند التعب ، المقاومة عند التآكل و مجموعة الاجهادات المتبقية للضغط. إن الهدف من هذا البحث هو تطبيق عملية التدميك على الفولاذ X8CrNiS18-9 بواسطة أداة مصممة و مصنعة خصيصا لهذا الغرض ، و التحقق من درجة صلاحية هذا التصميم من خلال دراسة مدى تأثير تلك العوامل التي تنتج عن التدميك وهي: عمق العملية و سرعة الدوران ، التغذية ، عدد تمريرات عملية التدميك على خشونة السطح (Ra) لهذا الفولاذ و هذا باستعمال تصميم مركب مركزي دائري ، اعتمادا على دراسة إحصائية من أجل استنتاج نموذج رياضي يربط خشونة السطح بدلالة العوامل الأربعة لعملية التدميك .

إن نتائج التجربة بينت أن هناك تحسن في خشونة السطح بنسبة 65% مما يدل على نجاح هذا العمل .

كلمات المفتاح : الفولاذ X8CrNiS18-9 - التدميك - خشونة السطح - صلادة السطح

Abstract

Ball burnishing is a superficial plastic deformation process which allows mechanical processing by cold forming of surfaces and mechanical parts. It was used gradually as a finishing operation which gives additional advantages such as: the increase in surface hardness, resistance to fatigue, resistance to wear and to the generation of residual compressive stresses. The aim of this research is to make a study, a design, and a realization of ball burnishing tool as well as its validation by studying the influence of its parameters namely: rolling depth, speed of rotation, advance and number of tool passes in the surface roughness (Ra) of a steel X8CrNiS18-9. This has been achieved by applying a complete factorial experimental plan based on a statistical study to determine a mathematical model and links the surface roughness as a function of the four parameters of the ball rolling regime.

The experimental results revealed that an improvement of roughness of about 65% was obtained, which enabled us to validate our objective.

Keywords: steel X8CrNiS18-9, ball burnishing, roughness, experimental design.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I :

Figure I. 1 Courbe de traction (contraint/déformation).....	4
Figure I. 2 Principe de la durté Brinell.....	6
Figure I. 3 Principe de mesure de la durté Rockwell.....	7
Figure I. 4 Principe de durté Vichers.....	7
Figure I. 5 Représentation schématique de la surface.....	11
Figure I. 6 Classement des irrégularités de surface.....	11
Figure I. 7 Influence de la topographie sur le comportement des surfaces et du milieu intrafacial (troisième corp).....	12
Figure I. 8 Paramètres de rugosité.....	13
Figure I. 9 Principe de fonctionnement du brunissage.....	15
Figure I. 10 Outil du brunissage commercialisé par la firme COGSDILL TOOL.....	15
Figure I. 11 Différenes surfaces à traiter par galetage.....	15
Figure I. 12 Différents types de galetage.....	17

CHAPITRE II:

Figure II. 1 Schéma d'un ressort hélicoidal.....	23
Figure II. 2 Schéma de dimension de ressort compression.....	25
Figure II. 3 Contrainte de torsion.....	29
Figure II. 4 Contrainte de cisaillement.....	29
Figure II. 5 Contrainte de torsion+cisaillement+fatigue de vibration.....	31
Figure II. 6 Réaction des pièces.....	31
Figure II. 7 Schéma de filets triangulaire (métrique ISO).....	32
Figure II. 8 Mode de ruine de l'assemblage vissé.....	33
Figure II. 9 Relation entre l'angle, le diamètre et le pas de l'hélice.....	33
Figure II. 10 Schéma de deux manières de calculer l'aire cisailée.....	34
Figure II. 11 Action de contact sur un filet ISO.....	36
Figure II. 12 Schéma de la déformation des irrégularités de surface lors d'un traitement par bille.....	42
Figure II. 13 Illustration de la zone de recouvrement de la bille de galetage.....	46
Figure II. 14 Roulement à une rangé de billes à contact oblique.....	47
Figure II. 15 Dimension de roulement.....	47
Figure II. 16 Assemblage mandrin support-manchon guide.....	50

CHAPITRE IV:

Figure IV. 1 Schéma de l'expérimentation.....	84
Figure IV. 2 Espace expérimental et domain d'étude.....	86
Figure IV. 3 Disposition des points expérimentaux d'un plan 2.....	91
Figure IV. 4 Tour universel WEILER GmbH.....	95
Figure IV. 5 Routage d'usinage pour l'acier.....	96
Figure IV. 6 Dessin définition de l'éprouvette.....	97
Figure IV. 7 Appareil de mesure des étas de surface (SURFTEST SJ-410Mitutoyo).....	97
Figure IV. 8 Effet de le profondeur de galetage sur la rugosité de surface.....	102
Figure IV. 9 Effet du nombre de passes de l'outil sur la rugosité de surface.....	103
Figure IV. 10 Effet de la vitesse de rotation sur la rugosité de surface.....	103
Figure IV. 11 Effet de l'avance de galetage sur la rugosité de surface.....	104
Figure IV. 12 Effet de l'interaction du nombre de passes de l'outil et l'avance de galetage sur la rugosité de surface.....	105
Figure IV. 13 Effet de l'interaction de la vitesse de rotation et l'avance de galetage sur la rugosité.....	106

NOMENCLATURE

SYMBOLES	DESIGNATION
$Y_p - Y_v$	Hauteur d'un pic – Profondeur d'un creux, en rugosité de surface, par rapport à la ligne moyenne.
R_p	Hauteur – profondeur maxi des pics et creux, en rugosité de surface, par rapport à la ligne moyenne.
R_y	Ecart entre le pic le plus haut et le creux le plus profond ($R_y = R_p + R_m$) sur la longueur de base, en rugosité de surface.
R_z	Hauteur des irrégularités sur dix points = moyenne des valeurs absolues des 5 Y_p et 5 Y_v les plus grands, sur 5 segments d'évaluation consécutifs, en rugosité de surface.
S_i	Pas de saillies locales du profil, en rugosité de surface.
S_{mi}	Pas des irrégularités du profil = longueur de la ligne moyenne contenant un pic et un creux consécutif, en rugosité de surface.
H_v	Nombre de duretés Vickers.
HB	Nombre de duretés Brinell.
HRC	Nombre de duretés Rockwell.
σ	Contrainte conventionnelle par traction.
ϵ	Déformation conventionnelle par traction.
τ	Contrainte de cisaillement.
G	Module d'élasticité transversal ou module de Colomb.
s	Coefficient de sécurité
E	Module d'élasticité longitudinal ou module de Young.
k	Constante.
σ_0	Contrainte d'écoulement représentant la frontière entre le domaine élastique et le domaine plastique.
n	Coefficient d'écrouissage ou de consolidation.
ϵ_s	Allongement plastique homogène ou allongement avant striction.
v	Vitesse de galetage.
f	Avance de galetage.
v_c	Vitesse de coupe (usinage).
a_c	Avance de coupe (usinage).
p_c	Profondeur de coupe (usinage).
R_t	Moyenne arithmétique des écarts de profil, en rugosité de surface, par rapport à la ligne moyenne, après tournage.
R_a	Moyenne arithmétique des écarts de profil, en rugosité de surface, par rapport à la ligne moyenne, après galetage.
R_e	Limite de résistance à l'élasticité, en traction.
R	Limite de résistance à la rupture, en traction.
A	Allongement en %.
R_{er}	Limite de résistance à l'élasticité, en traction, après recuit.
R_r	Limite de résistance à la rupture, en traction, après recuit.
A_r	Allongement en %, après recuit.
σ	Limite d'endurance ou résistance à la fatigue pour un nombre de cycles infini.
R_{ev}	Limite de résistance à l'élasticité, en traction, après revenu.
R_v	Limite de résistance à la rupture, en traction, après revenu.
A_v	Allongement en %, après revenu.
\hat{y}	Fonction du modèle mathématique.
a	Coefficients du modèle mathématique.
\bar{y}	Moyenne de tous les \bar{y}_i obtenus par les expériences réalisées

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I :

Tableau I. 1 Comparaison des trois méthodes principales utilisées pour la détermination de la durée	9
--	---

CHAPITRE II :

Tableau II. 1 Caractéristiques mécanique des matériaux	19
Tableau II. 2 Caractéristiques mécaniques de chaque pièce.....	20
Tableau II. 3 Compositions chimique et caractéristiques mécanique de matériau NF A 47-301	24
Tableau II. 4 Les données de ressort	26
Tableau II. 5 Caractéristiques de matériau	31
Tableau II. 6 Profil d'assemblage.....	32
Tableau II. 7 Résistance en traction des matériaux courants.....	35
Tableau II. 8 Résistance en cisaillement des matériaux courants.....	35
Tableau II. 9 Coefficients de frottement acier sur acier selon la finition et la lubrification.....	37
Tableau II. 10 Etat de calcul d'assemblage mandrin support et tete de l'outil	40
Tableau II. 11 Etat de calcul d'assemblage vis de réglage et corps de l'outil	41
Tableau II. 12 Caractéristiques de matériau	44

CHAPITRE IV :

Tableau IV. 1 Matrice d'expériences	88
Tableau IV. 2 Compsition chimique de X8CrSi18-9.....	94
Tableau IV. 3 Caractéristiques mécaniques de X8CrNiS18-9.....	94
Tableau IV. 4 Caractéristiques de la machine-outil.....	95
Tableau IV. 5 Valeur d'échantillonnage d'évaluations standards pour la détermination de Ra.....	98
Tableau IV. 6 Matrice d'expériences et résultats	99
Tableau IV. 7 Coefficients des modèles et leurs signification.....	100
Tableau IV. 8 Test de Fisher pour la rugosité de surface	101
Tableau IV. 9 Valeurs et niveaux de variation des paramètres du gale	102

INTRODUCTION GENERALE

Dans les structures mécaniques, les surfaces des organes de machines sont les plus exposées aux attaques extérieures qui sont de natures diverses (frottement, usure, corrosion, fatigue, etc.), des sollicitations dynamiques (sollicitations de fatigue) qui occasionnent la rupture brutale des pièces en service. Dans la pratique, il a été constaté que la majorité des cas de rupture débute souvent avec un amorçage en surface. Elle est également la partie de la pièce où se produisent les phénomènes de frottement, de grippage et de matage. De plus, les zones superficielles sont souvent les plus sollicitées à cause des concentrations de contraintes imposées par la géométrie d'une pièce mécanique (présence de trous, des entailles et autres discontinuités géométriques).

La qualité de la couche superficielle représente un facteur essentiel pour l'intégrité de la structure mécanique. En effet, la dégradation de la surface de la pièce entraîne l'effondrement de la pièce, ce qui occasionne des avaries voire l'arrêt des ensembles mécaniques (machines, équipements de transport, mécanismes de sécurité, etc.).

Le comportement des pièces mécaniques est donc lié aux propriétés des couches superficielles. Ces dernières sont caractérisées par les qualités physiques et géométriques ; elles présentent une importance particulière afin de satisfaire à des exigences précises telles que : une bonne tenue à l'usure, une grande résistance à la fatigue, un faible coefficient de frottement et une bonne résistance aux divers types de sollicitations. Ces exigences sont d'une grande importance, non-respect des dysfonctionnements dans l'ensemble et peut entraîner des dégradations prématurées. Sachant qu'une bonne tenue des pièces en service est conditionnée par les propriétés (physiques et géométriques) des couches superficielles et que les propriétés micro géométriques (rugosité) ainsi que la dureté superficielle, accommodent de manière décisive le comportement et la durée de vie des organes mécaniques. Ainsi entre le moment où l'on décide de concevoir une structure industrielle ayant une fonction donnée et le moment de sa mise en service, il existe plusieurs étapes que les industriels doivent maîtriser. Une de ces étapes représente le choix du matériau et des procédés de mise en œuvre. Ces derniers sont très variés dans la fabrication mécanique. Ils comprennent plusieurs modes d'obtention d'ébauche, plusieurs procédés de mises en forme et un grand nombre de traitements. Les procédés de mises en forme sont pour une grande part basés sur l'enlèvement de matière avec l'emploi des outils à arêtes définies ou non définies. Les outils de coupe employés sont de matériaux divers (acier rapide de coupe, carbure divers, carbures revêtus par les procédés PVD, les céramiques, les outils en diamants) permettent d'usiner des métaux et des alliages de plus en plus durs. Les outils à arêtes non définies (meule par exemple)

sont prévus dans l'usinage de finition (rectification) qui est préconisée après les phases de traitements thermiques pour la correction des défauts géométriques et l'amélioration de l'aspect de surface.

Les procédés sans enlèvement de copeaux ou traitements mécaniques de surface (TMS), qui agissent par déformation plastique superficielle (DPS) trouvent leur place comme procédés de finition, assurent aux pièces usinées de bonnes propriétés physique et géométrique avec un indice économique relativement amélioré. Les procédés par (DPS) sont d'une mise en œuvre relativement simple, moins coûteux et consistent à améliorer les propriétés locales (en surface) du matériau.

C'est dans ce contexte et pour ce but que cette étude est orientée sur les traitements mécaniques de surface (TMS). On tente de donner des propriétés particulières aux couches superficielles des pièces en acier, en leur appliquant le traitement par (DPS) en l'occurrence le galetage. Bien que les études entreprises jusqu'à ce jour dans le domaine de la déformation plastique des matériaux aient permis des progrès importants du processus, il est nécessaire de les réactualiser et de les poursuivre afin de répondre aux nouvelles conditions du contexte industriel. Il apparaît, en particulier que la complexité des interactions de nombreux facteurs impliqués dans les phénomènes de déformation, nécessite des expérimentations spécifiques et bien contrôlées pour chaque matériau dans le but de définir les meilleurs paramètres de traitement (régime optimal) relatifs aux réponses exigées.

Dans le premier chapitre sont présentées une étude bibliographique sur les métaux et leurs propriétés mécaniques, les traitements de surface. On situe le choix du procédé de traitement, les différents essais de dureté, l'état de surface et procédé de traitement mécanique de surface (TMS) par galetage.

Le deuxième chapitre est consacré à la partie de conception de l'outil de galetage à bille et l'étude de résistance des matériaux des pièces.

Le troisième chapitre est l'étude complète de instrument à réalisée nous présentons dans ce chapitre une méthode développées et étude des analyse de fabrication qui nécessite à nous du préparer du bureau des méthodes.

Concernant le quatrième chapitre est consacré à l'étude de la partie statistique de traitement mécanique de surface (TMS) par galetage, une synthèse des résultats expérimentaux et leurs discussions a été présentés la présentation des paramètres de régime par logiciels Minitab, suivi par une conclusion générale.

CHAPITRE I :

Généralité sur les traitements mécaniques

I.1 Introduction

Un matériau est une substance matière d'origine naturelle ou artificielle que l'homme utilise pour produire des objets. Un matériau, représente une matière de base choisie en raison de ses propriétés particulières et de la mise en œuvre en vue d'un usage spécifique. Les propriétés particulières des matériaux sont offertes par la nature chimique des différentes matières premières. On distingue ainsi quatre grandes familles de matériaux : métalliques, composites, organiques, minéraux. Les matériaux métalliques sont des métaux purs ou des alliages de métaux [1].

Les métaux présentent tous l'éclat métallique sur une coupe fraîche, dû à la réflexion de la lumière sur le nuage d'électrons libres; à l'exception du mercure, les métaux sont solides à température et à pression normales, en raison de la valeur élevée de l'énergie de la liaison intermétallique ; ils présentent habituellement de bonnes propriétés mécaniques, particulièrement la ductilité et la malléabilité qui tiennent à la souplesse de la liaison métallique et d'autres propriétés physiques tels que la conductibilité électrique et thermique.

I.2 Propriétés mécaniques des métaux

Les propriétés mécaniques courantes des métaux sont liées aux concepts usuels d'élasticité et de plasticité. Elles résultent des différentes orientations des cristaux et de la présence des joints de grains.

I.2.1 Elasticité et plasticité

L'une des propriétés principales de l'état métallique est l'aptitude à la déformation sous l'effet d'une contrainte. Selon la valeur de celle-ci, la déformation résultante peut être élastique, c'est-à-dire qu'elle se résorbe si la contrainte cesse d'être appliquée, ou plastique, dans ce cas le solide conserve une déformation permanente après que la sollicitation mécanique est été supprimée [2]. On caractérise quantitativement la plasticité par l'aptitude d'un métal ou d'un alliage donné à tolérer sans se rompre une déformation plus ou moins importante. Cette propriété, qui tient à la nature de la liaison entre atomes constituant le solide métallique, est spécifique [1]. Les solides métalliques témoignent généralement à la fois d'une notable résistance et d'une capacité importante de déformation. On mesure les différentes phases de déformation et même de rupture de tous les matériaux en utilisant l'essai de traction. Cet essai pratiqué sur des éprouvettes, permet de construire une courbe (contraintes/déformation) (Fig.I.1). La courbe nous renseigne sur deux zones principales, c'est-à-dire deux états ou propriétés du matériau et qui sont : la une zone de déformation élastique appelée élasticité (OA) et la une zone de déformation plastique, appelée plasticité (AB).

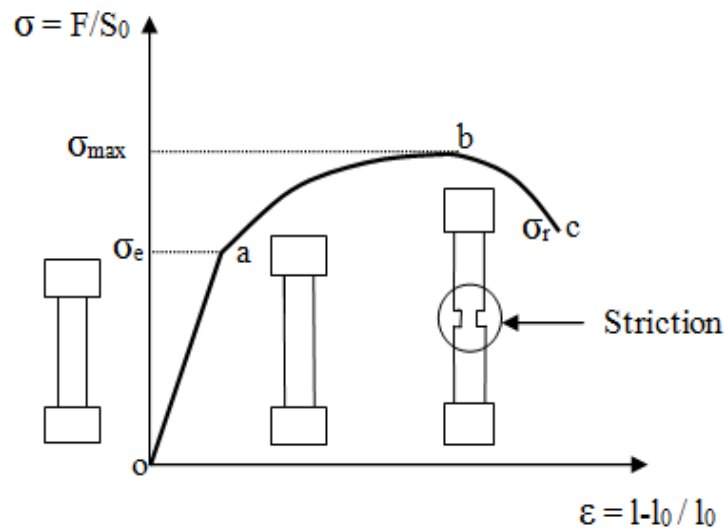


Figure I.1 Courbe de traction (contrainte/déformation).

L'élasticité est la faculté que possède le métal de pouvoir subir une déformation qui cesse après suppression de l'effort qui la provoque, quand un échantillon de métal est soumis à un effort relativement faible, il ne subit que des déformations élastiques. La position moyenne des atomes n'est que légèrement modifiée.

La plasticité du métal revêt deux aspects principaux :

- malléabilité : possibilité de réduire le métal en feuille plus ou moins mince.
- ductilité : faculté de pouvoir étirer le métal en fils sans le rompre.

I.2.2 Résistance mécanique

C'est la capacité d'une structure de résister aux efforts mécaniques extérieurs, le plus souvent cette grandeur est caractérisée par la résistance à la rupture « σ_r » mesurée à la suite d'un essai de traction, c'est la grandeur la plus utilisée pour la majorité des pièces soumises à un chargement statique [2, 3].

I.2.3 Rigidité

Intervalle de la déformation élastique réversible d'une structure atomique. Cette propriété est liée aux forces inter atomiques dues à la variation de distance entre les atomes. Elle est caractérisée par le module longitudinal de Young où la loi de Hooke est valable. Elle est mesurée suite à un essai de traction [4,5].

I.2.4 Ductilité

C'est le domaine de la déformation permanent irréversible d'une structure, souvent désigné sous le nom de domaine plastique, cette plasticité est due au glissement irréversible entre les plans cristallographiques du matériau, un matériau ductile peut être étiré ou allongé sans se rompre [4].

I.2.5 Ténacité

Elle représente la capacité globale du matériau à absorber l'énergie d'une déformation, et caractérise sa résistance à la propagation brutale de la fissure. Cette propriété est quantifiée par la mesure de la résilience [4,6].

I.2.6 Résistance à la fatigue

Elle caractérise la résistance à une sollicitation cyclique, type traction compression ou autre, elle est caractérisée par la limite d'endurance « σ_D » qui est mesurée par les courbes de Wöhler [7].

I.2.7 Dureté

L'essai de dureté sert à caractériser la résistance à la déformation plastique d'un matériau non fragile à l'aide d'un essai simple et rapide. La dureté est définie comme la résistance opposée par l'éprouvette à la pénétration d'un corps plus dur.

Comme la géométrie de l'écoulement plastique lors d'un essai de dureté est complexe, l'essai de dureté n'est pas considéré comme une analyse du comportement mécanique d'un matériau au même titre que l'essai de traction. L'essai de dureté ne fournit qu'une seule valeur. En revanche, l'essai est très simple à réaliser, n'utilise pas de machine coûteuse et n'exige pas l'usinage d'une éprouvette, puisqu'une surface plane de quelques mm suffit. En résumé, c'est un essai bon marché et souvent employé pour des essais comparatifs de séries d'éprouvettes et pour examiner les effets des divers traitements thermiques, thermomécaniques ou thermo-chimiques.

De nouvelles techniques ont élargi le champ d'application de l'essai de dureté. Ainsi les fabricants proposent maintenant des appareils permettant de mesurer quelques caractéristiques supplémentaires (Module Young, Module de Coulomb, Coefficient de Poisson, Viscosité, Forces d'adhésion (entre la pointe et le substrat) ou encore ténacité et énergie de rupture, etc.) à partir de l'enregistrement de la courbe force-déplacement [8].

I.2.7.1 Dureté et résistance en traction

La dureté comme la résistance à la traction R_m , déterminée à partir de l'essai de traction, fonctions de la limite d'élasticité et de l'écrouissage. Il n'est donc pas surprenant qu'on trouve souvent une assez bonne corrélation linéaire entre ces deux valeurs lorsqu'on compare les alliages d'un même type (aciers au carbone, alliages à base d'Al, etc.)

$$R_m(\text{en MPa}) \approx \gamma \cdot H \quad (\text{I. 1})$$

H est la dureté Vickers HV ou Brinell HB et γ une constante qui dépend du type d'alliage considéré. Pour les aciers au carbone et les aciers faiblement alliés γ vaut environ [3].

I.2.7.2 Types d'essais

▪ Essai de dureté Brinell

L'essai a été édité dès 1924. Il consiste à faire pénétrer dans le métal à tester, une bille polie de forme sphérique en acier trempé ou en carbure de tungstène (Fig. I.2). Le diamètre D utilisé peut valoir 1 mm, 2,5 mm, 5mm et 10mm. La charge appliquée sur le métal est maintenue pendant 15 à 30s selon le solide. Après l'annulation de la charge, la bille laisse dans le métal une empreinte circulaire permanente dont on mesure le diamètre (quel type de diamètre normalement c'est le diamètre moyen).

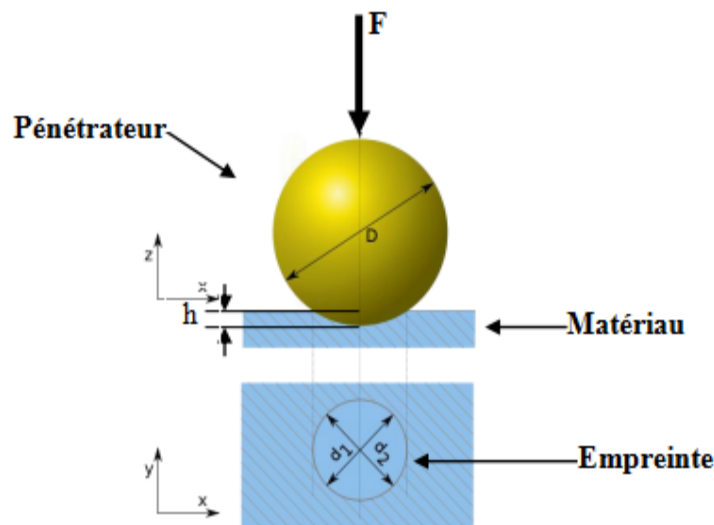


Figure I.2 Principe de la dureté brinell.

La force F étant exprimée en kgf, le diamètre de l'empreinte d (même remarque) en mm et la dureté Brinell HB est exprimée en kgf/mm^2 selon la relation suivante (I.2).

$$HB = \frac{2F}{\pi \times D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

▪ Essai de dureté Rockwell

L'essai consiste à mesurer la profondeur rémanente de l'empreinte indentée. Le pénétrateur de forme géométrique conique pour le critère HRC (Fig. I.3.a), ou bien sphérique pour le critère HRB (Fig. I.3.b) est appuyé sous faible charge, sur la surface à essayer et dans des conditions bien précises. Le pénétrateur conique est en diamant de section circulaire et d'angle au sommet 120° à pointe arrondie sphérique de rayon de 0,2mm. Le pénétrateur sphérique est une bille d'acier trempée polie de diamètre 1,588mm ou 3,175mm [8]. L'essai se déroule en trois phases.

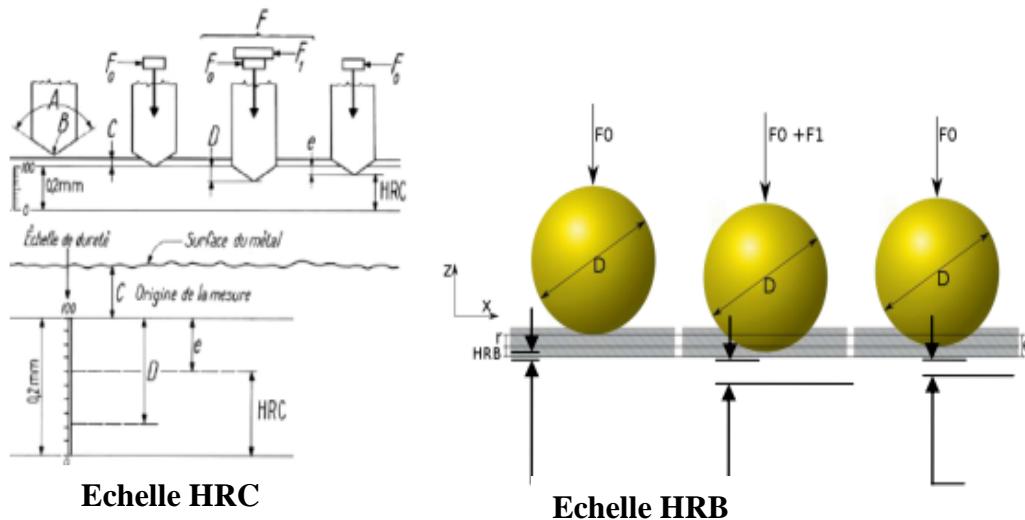


Figure I.3 Principe de mesure de la dureté Rockwell

- Une phase I de pénétration initiale avant charge additionnelle : après application d'une charge initiale $F_0 = 98\text{N}$ (10 kgf). La profondeur de pénétration étant l'origine qui sera utilisée pour la mesure de la dureté.
- Une phase P de pénétration avec charge additionnelle : Sous la charge supplémentaire F_1 , le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur P.
- Une phase R de pénétration rémanente sans la charge additionnelle : La force F_1 est relaxée et on lit les indications de l'enfoncement.

▪ L'essai de dureté Vickers

Il consiste à imprimer dans le métal testé une empreinte avec un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidale à base carrée et d'angle au sommet entre deux faces opposées de 136° , sous l'action d'une force connue. On mesure la diagonale de l'empreinte laissée par le pénétrateur (Fig. I.4).

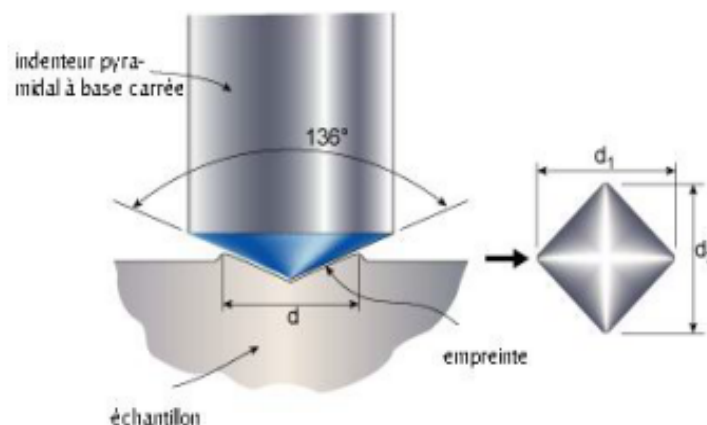


Figure I.4 Principe de dureté Vickers.

Généralement la gamme des forces utilisables (5 à 100 kgf) permet d'appliquer cette méthode avec toutes les dimensions d'échantillons. Pour des raisons de fiabilité de l'essai, la force est choisie de telle manière à donner une empreinte ayant la diagonale moyenne inférieure aux deux tiers de l'épaisseur d'empreinte. D'autres sources préconisent que la profondeur de pénétration ne dépasse pas le huitième de l'épaisseur de la pièce à tester [8].

La force F étant exprimée en kgf, le diamètre de l'empreinte d en mm et la dureté Vickers est exprimée en kgf/mm^2

Selon la relation suivante (I.3).

$$HV = \frac{1,8454P}{d^2} \quad (\text{I. 3})$$

Avec $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

L'essai de Vickers est celui qui fournit la plus grande diversité de renseignement. Il possède deux avantages principaux : être souvent non destructifs et pouvoir être répété un grand nombre de fois ; c'est-à-dire se prêter à une interprétation statistique (dislocation des diagonales d'empreinte suivant une loi gaussienne).

▪ **Intérêt et application des essais d'indentation**

Le tableau I.1 regroupe les principales directives pour une bonne réalisation d'un essai de dureté par indentation [9].

Type d'essai	Brinell	Vickers	Rockwell
Symbole	HB	HV	HR
Pénétrateur	Bille de diamètre D en acier trempé. Dureté min 6 HB	Pyramide régulière, à base carré. Angle entre 2 faces opposées: 136°	HR _C : cône en diamant, angle au sommet = 120° HR _B : bille d'acier
Mode d'application de la charge	Chargement progressif pendant 15 s, maintien 15 s puis décharge	Comme HB	Précharge P_0 , puis charge supplémentaire, et retour à P_0
Valeur mesurée	Moyenne de 2 diamètres perpendiculaires d de l'empreinte	Moyenne des 2 diagonales d	Profondeur de pénétration
Adaptation à la dureté du matériau	Choix de la charge P telle que $0,3 D < d < 0,6 D$	Choix de la charge P telle que $d > 0,4 \text{ mm}$	-
Mesure pour H (voir formules)	P /surface de la calotte sphérique	P /surface de l'empreinte pyramidale	Complément' à la profondeur de pénétration
Application principale	Aciers non trempés, fontes, soudures, métaux non-ferreux	Aciers trempés, aciers à outils	Aciers trempés
Avantages	D étant relativement large HB convient pour les matériaux hétérogènes	Pratiquement indépendant de la charge. Convient bien pour les pièces minces	Mesure la plus simple, la lecture directe permet une acquisition des données automatiques
Inconvénients	HB est fonction de la charge. Formation de bourrelets au bord de l'empreinte	Ne convient pas pour les matériaux hétérogènes (petite empreinte)	Dispersion importante des mesures

Tableau I.1 Comparaison des trois méthodes principales utilisées pour la détermination de la dureté

Les différents essais par pénétrateurs ont permis d'établir des relations empiriques [10, 11] à partir de corrélation entre la dureté Vickers HV, la dureté Brinell HB et la résistance de la rupture R_m pour différents aciers (relations I.4 et I.5):

$$R_m = 77,14 + 2,6396 HV + 0,0010 HV^2 \quad (I.4)$$

$$R_m = 164,71 + 2,222 HB + 0,002 HV^2 \quad (I.5)$$

A partir de ces deux relations, il est possible de relier directement les duretés Vickers et Brinell. Différentes autres relations sont proposées dans la bibliographie pour relier les duretés et les caractéristiques mécaniques des matériaux [12] mais ces relations sont empiriques et doivent être utilisées avec prudence.

I.3 Qualité physico-géométrique

On appelle états de surface les irrégularités des surfaces dues au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage, etc.). Ils sont, le plus souvent, mesurés avec des appareils à palpeur à pointe de diamant, appelés profilomètres, qui relèvent le profil de la surface. Ces appareils impriment un graphique anamorphosé du profil réel palpé (c'est-à-dire que l'agrandissement vertical est plus important que l'agrandissement horizontal). Ce graphique permet de visualiser la forme des irrégularités et d'estimer leur profondeur et leur espacement.

I.3.1 La surface

En tribologie, la surface ne définit pas uniquement la zone de séparation des corps, mais concerne toutes les caractéristiques du contact qui jouent un rôle sur le frottement, c'est-à-dire sur les contraintes mécaniques, les températures et les comportements du troisième corps (lubrifiant, débris d'usure, etc.). Par conséquent, on admettra que les paramètres définissant la surface correspondent à l'ensemble des propriétés mécaniques, physiques et chimiques des matériaux en présence, ainsi qu'aux caractéristiques géométriques du contact incluant, par extension, la forme des pièces [8,9].

I.3.2 L'état structural et physique

D'une façon générale, les caractéristiques d'une surface diffèrent de celles du matériau (dans la masse), d'une part parce que la symétrie de la structure atomique est rompue (modification des forces de liaison, de la concentration en défauts, etc.), d'autre part parce que l'environnement (atmosphère, contraintes appliquées, température, etc.) peut modifier considérablement les couches superficielles, en créant des concentrations d'éléments très différentes des valeurs moyennes volumiques.

Après qu'elle ait été « préparée » par (traitements thermiques, usinages...) et placée dans son

environnement de travail, une surface est constituée d'une succession de couches représentée schématiquement dans la fig.I.5.

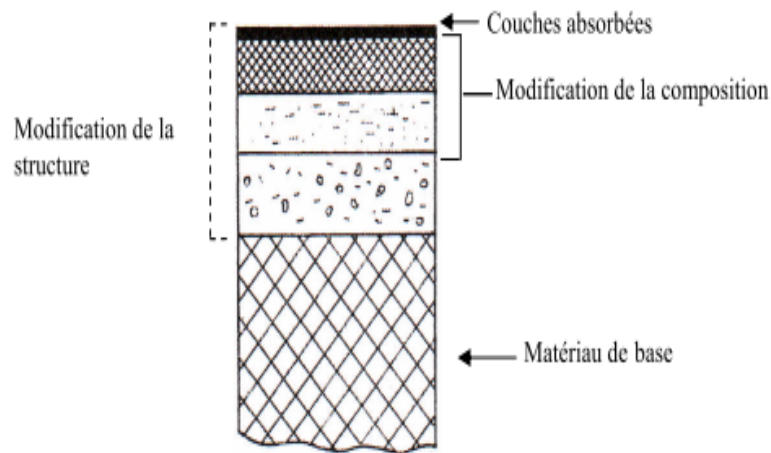


Figure I.5 Représentation schématique de la surface [8].

I.3.3 Topographie

I.3.3.1 Définition

Ce terme générique regroupe l'ensemble des facteurs caractérisant les irrégularités géométriques d'une surface, qui vont du domaine microscopique défini plus généralement par la rugosité, au domaine macroscopique correspondant à la géométrie de contact. Les irrégularités d'une surface peuvent être classées en trois niveaux (fig. I.6). Sont donc concernés tous les effets qui résultent de la mise en œuvre et du parachèvement d'une pièce mécanique (opérations de mise en forme, de mise à la côte, traitements thermiques, traitements de surfaces), et en particulier :

- la génération de sillons, aspérités, cavités, porosités, etc.
- la génération de défauts de forme (linéarité, circularité, etc.).

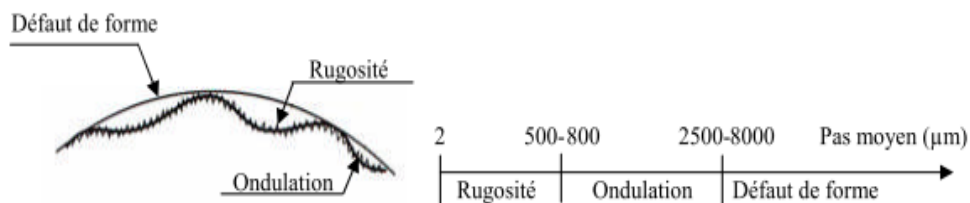


Figure I.6 Classement des irrégularités de surface.

I.3.3.2 Importance de la topographie

La rugosité est un paramètre important dont on connaît par ailleurs ses effets sur la résistance à la corrosion et le comportement mécanique des matériaux.

La topographie agit sur la plupart des facteurs qui gouvernent le comportement au frottement et à l'usure, et notamment (Fig. I.7): le mode de contact ; le comportement du milieu inter faciale (troisième corps).

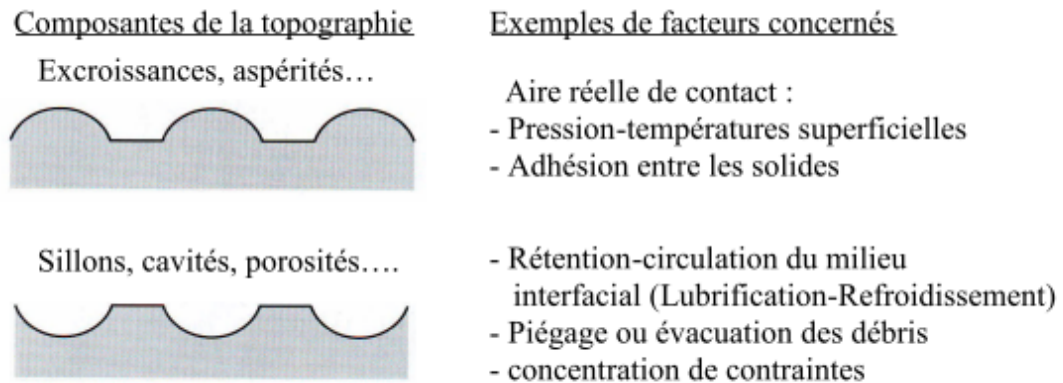


Figure I.7 Influence de la topographie sur le comportement des surfaces et du milieu inter faciale (troisième corps).

Lorsqu'elle concerne plus particulièrement le domaine des pièces d'outillage destinées à la mise en forme (coupe, déformation, moulage, etc.), la rugosité constitue aussi un facteur déterminant pour la qualité des produits finis (propriétés d'aspect, etc.)[10].

La rugosité intervient de manière prépondérante dans le processus de galetage, auquel est systématiquement liée une diminution des irrégularités de surface ; cette évolution correspond à une élimination des aspérités, se produisant ou bien par cisaillement - déchirement (avec émission de débris), ou bien par consommation chimique (action des additives extrêmes pressions des lubrifiants), ou bien encore par plastification.

La définition de la topographie prend en compte toutes les caractéristiques des irrégularités de surface : dimensionnelles (par exemple hauteur des « pics »), géométriques (par exemple forme, acuité des aspérités ou des cavités), mais aussi la répartition et l'orientation (préférentielle ou aléatoire, etc.). Les caractéristiques topographiques des surfaces sont caractérisées par l'acuité, la forme, l'orientation des rugosités.

I.3.3.3 Paramètres de rugosité

Les paramètres d'état de surface les plus couramment utilisés sont récapitulés dans la fig. I.8.

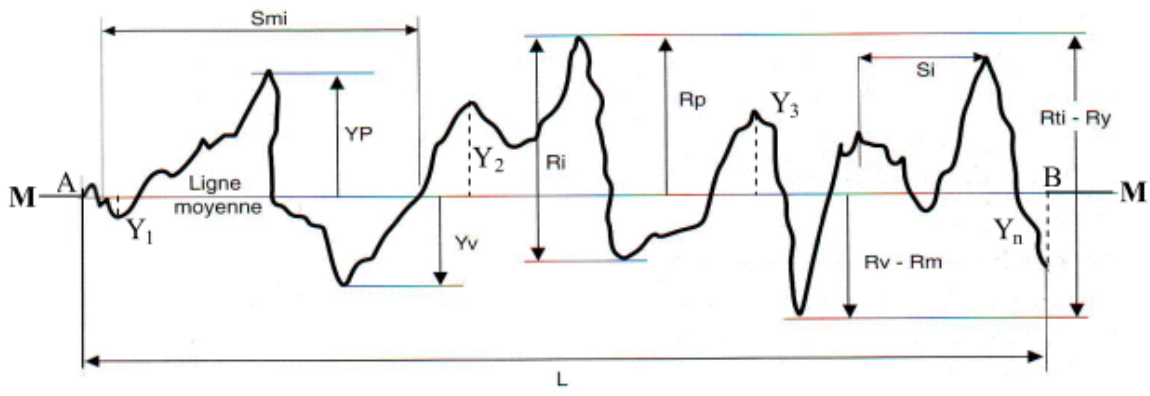


Figure I.8 Paramètres de rugosité.

- **MM** : Ligne moyenne indiquant la direction générale du profil.
- **L** : Longueur de base servant de mesure et de calcul les paramètres de rugosité.
- **YP** : Hauteur d'un pic par rapport à MM.
- **YV** : Profondeur d'un creux par rapport à « MM ».
- **Rp, Rv (ou Rm)** : Hauteur, Profondeur maxi des pics et creux, par rapport à « MM ».
- **RT** : Rt_i (ou Ry) Ecart max sur la longueur d'évaluation, ($Ry=Rp+Rm$).
- **Rtm** : Moyenne des Rt_i sur la longueur totale d'évaluation.
- **R_i** : Profondeur élémentaire de la rugosité.
- **R** : Profondeur moyenne de la rugosité (moyenne R_i sur la longueur d'évaluation).
- **Rmax** : Profondeur maximum de la rugosité.
- **R_z** : Hauteur des irrégularités sur 10 points (moyenne des valeurs absolues des $5Y_p$ et $5Y_v$ les plus grands, sur 5 segments d'évaluation consécutifs).
- **R_a** : Moyenne arithmétique des écarts de profil par rapport à la ligne moyenne, représente la valeur moyenne des distances des pointes successives.
- **Si** : Pas de saillies locales du profil.
- **Smi** : Pas des irrégularités du profil (moyenne des S_{mi} sur la longueur de base).

▪ Rugosité minimale

Ramenée aux facteurs dimensionnels et de forme, cette notion sous-entend principalement :

- hauteur minimale des rugosités ;
- acuité (rayon de courbure) minimale des pics.

La première prescription s'adresse en particulier aux contacts travaillant en régime lubrifié, domaine pour lequel la hauteur des aspérités détermine l'épaisseur critique des films lubrifiants.

La seconde prescription quant à elle est quasi universelle puisqu'elle vise, par l'amélioration de la portance (accroissement de la surface réelle de contact), à diminuer les pressions superficielles et les risques de vieillissement ou de dégradation qui lui sont associés.

La diminution de l'acuité des aspérités va notamment dans le sens d'une amélioration de la tenue des films superficiels favorables, et plus particulièrement ceux sensibles aux effets de surcharge localisée (Films minces et/ou fragiles à base d'oxydes, etc.). Pour un grand nombre de situations, la recherche d'une rugosité optimale se substitue à celle d'un perfectionnement du « poli » des surfaces.

L'un des critères de mesure de rugosité largement employé est la rugosité (R_a). Elle se représente par les irrégularités relevées comme les écarts de profil effectif par rapport à la ligne de référence définie sur la longueur de base, et calculée par la formule suivante :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_A^B |Y(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i| \quad (I.6)$$

Où n : nombre de pointes successive du profil ; $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ par rapport à la ligne « MM »

I.4 Traitement mécanique de surface par galetage

I.4.1 Introduction

A travers une opération de mise en œuvre, on vise généralement à améliorer les aptitudes en service des pièces mécaniques, tant sur le plan résistance pendant le fonctionnement (tenue à la fatigue, résistance à l'usure, résistance à la corrosion, etc.), que sur la qualité de précision des couches superficielles du produit [13, 14].

Les traitements mécaniques de surface (TMS) [15] sont des procédés qui mettent en œuvre une déformation plastique à froid des couches superficielles. Ces procédés conduisent en général à une surface caractérisée par une faible rugosité [16,17], un écrouissage des couches superficielles et des contraintes résiduelles de compression. De ce nouvel aspect se déduit une amélioration de la plupart des propriétés mécaniques telles que ; la tenue en fatigue [18] la résistance à l'usure, etc.

Parmi ces 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.

I.4.2 Définition et principe

Le galetage constitue un traitement de mise en œuvre à froid, il déforme plastiquement les couches superficielles [19] d'une pièce ayant subi en général un usinage préalable par enlèvement de copeaux (Fig. I.9).

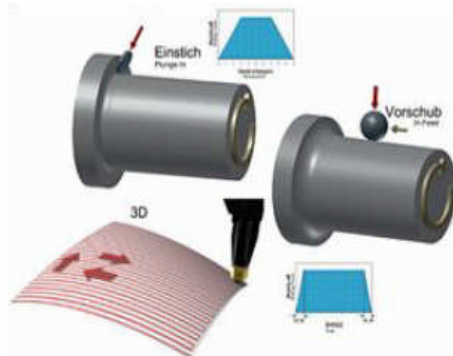


Figure I.9. Principe de fonctionnement du galetage.

La technologie du procédé est variée selon la machine et l'outil utilisé [19, 20]. 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.

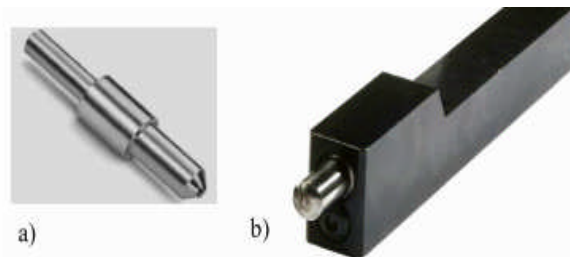


Figure I.10. Outil du galetage commercialisé par la firme COGSDILL TOOL:

a) partie active, b) corps de l'outil.

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) [21].

Le procédé intéresse aussi bien les surfaces extérieures que les surfaces intérieures (Fig. I.11). et peut être appliqué sur des pièces de haute dureté pouvant atteindre jusqu'à plus de 50HRC.

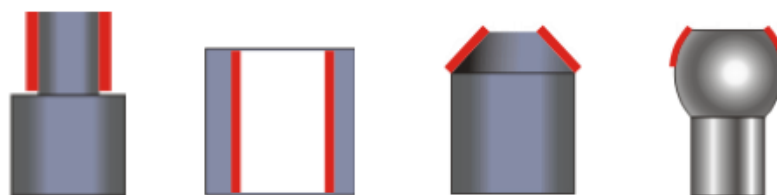


Figure I.11 Différentes surfaces à traiter par galetage.

I.4.3 Différents types de galetage

Le galetage se fait à l'aide d'un ou plusieurs galets en acier trempé ou en carbure métallique. Il est souvent appliqué à la surface usinée avec une force définie, lorsque les surfaces à usiner sont petites, les galets peuvent être remplacés par des billes en acier trempé ou céramique [6]. Il constitue une opération simple à exécuter, vu qu'elle peut être réalisée sur des machines-outils aussi bien classiques (tour, fraiseuse,...etc.), que spéciales (machine à galeter) [18]. Certains travaux ont montré que le galetage peut être appliqué aux différents types de matériaux à condition qu'ils remplissent les conditions suivantes :

- Résistance à la rupture $R < 130 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}$
- Dureté Rockwell HRC < 42
- Allongement > 6%

Selon les objectifs à atteindre et les buts recherchés, on distingue :

a) Le galetage de surface :

Il permet d'améliorer la surface du point de vue macro et micro géométrie. Toutefois, la tolérance finale ne dépend pas de cette seule action mais, en premier lieu, de la valeur dimensionnelle de l'opération antérieure, d'usinage par exemple, de la préparation de la surface de la pièce à galetter : tournage fin, rectification normale ou fine. Le galetage est donc fonction de l'approche dimensionnelle fournie par l'ébauche.

b) Le galetage dimensionnel ou de forme:

Le but est de modifier la forme initiale de la pièce, soit pour introduire des corrections volontaires destinées à un usage particulier (cas du galetage de pignons taillée en vue de réduire le bruit en fonctionnement) soit pour ramener la forme initiale dans la tolérance (cas du galetage d'ébauches de rotules obtenues par frappe). La tolérance se situe entre 0.1 et 0.15mm [18].

c) Le galetage de renforcement :

Il permet d'augmenter la résistance à la fatigue des pièces de construction soumises à des contraintes élevées. Par dépassement local de la limite d'élasticité, il se produit des précontraintes de compression qui ont une influences favorable sur l'endurance du matériau dans les zones soumises à fatigue, notamment alternée (exemple : galetage de congés de raccordement entre une partie cylindrique et un épaulement sur un arbre soumis à des flexions alternées).

Ces trois types de galetage sont schématisés dans la figure I.12

Le procédé de galetage développe des précontraintes de compression, se situant au voisinage de la limite d'élasticité, ces précontraintes rigoureusement réparties ont une influence

particulièrement favorable sur l'endurance du matériau dans les zones soumises à des contraintes aux fatigues sévères.

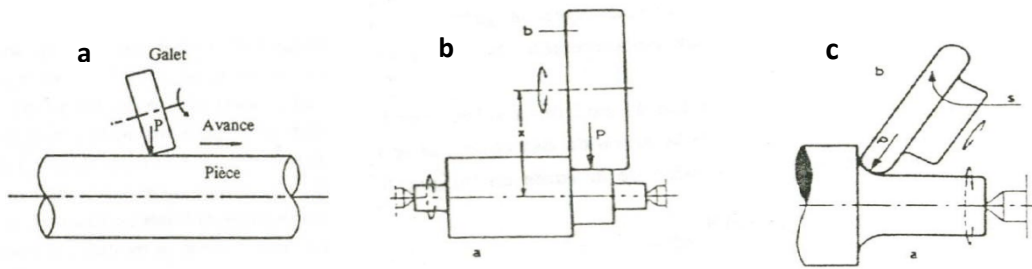


Figure I.12 Différents types de galetage

I.4.4 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.4.5 Effet du galetage sur l'état de surface

Après un traitement mécanique de surface par le procédé de galetage, l'état de surface obtenue d'une pièce mécanique varie en fonction de l'état initial comme il a été mentionné précédemment par les travaux. Si on considère que l'état initial est un usinage fin normal et qu'un traitement de surface est correctement réalisé, le galetage permet d'améliorer l'état de surface, dans la majorité des travaux de recherche réalisés dans le domaine du galetage la rugosité moyenne arithmétique « Ra » est le critère le plus utilisé pour exprimer l'état de surface.

L'effet d'amélioration de la rugosité de surface par galetage a une incidence directe sur l'augmentation de la capacité portante de la surface. Si l'on considère que pour un état de surface parfait, entendant par là rugosité nulle, le pourcentage de la capacité portante est de 100 %. Autrement, pour une même rugosité, ce pourcentage est plus important dans le cas d'une surface galetée que dans le cas d'une surface rectifiée, exemple pour un état de surface initial de rugosité $8 \mu\text{m}$ le pourcentage de la capacité portante est de 60 % pour une surface galetée, alors qu'il n'est que de 20 % pour une surface rectifiée.

I.5 Conclusion

Les propriétés mécaniques des métaux et alliages sont d'un grand intérêt puisqu'elles conditionnent non seulement les problèmes de mise en forme des matériaux mais également leur comportement en service dans des applications industrielles extrêmement diversifiées. Le choix du matériau d'une pièce industrielle dépendra des propriétés mécaniques tel que : résistance, dureté, ductilité. Il est donc nécessaire de mesurer ces grandeurs physiques par des essais mécaniques.

Pour définir les caractéristiques mécaniques des matériaux, on réalise des essais mécaniques sur des éprouvettes. Le but de ces essais est d'obtenir des valeurs des propriétés qui seront utilisables dans les calculs de résistance des matériaux ou qui permettront d'apprécier le comportement d'un matériau en service. Les corrélations sont entièrement empiriques et sont intéressantes du point de vue économique dans le cas où la mesure directe est difficile à effectuer.

CHAPITRE II :

Etude et conception de l'outil de galetage

II.1 Introduction

On a vu dans le premier chapitre que le procédé de galetage peut s'effectuer avec des outils fabriqués localement. Dans ce chapitre nous allons procéder à la conception de cet outil adapté aux besoins de notre des ateliers des rouleaux.

On a procédé en une conception sous environnement SolidWorks qui reste un logiciel puissant dans le domaine de la CAO.

II.2 Description de L'outil

II.2.1 Fonction de l'outil

L'outil en question est composé de dix pièces liées entre elles avec différentes liaisons (Tableau II.2).il est conçu pour galetter les surfaces externes des pièces cylindriques.

II.2.2 Caractéristiques

- La machine : tour conventionnels.
- Porte-outil : grands et petits porte-outils.
- Pression max fourni:25.726 N.

II.2.3 Réglage de l'outil

Le réglage de la pression de galetage peut s'effectuer soit à l'aide de la vis de réglage ou bien avec le délasement horizontal de chariot de la machine (tour).la pression zéro lorsque la bille serrer en contact avec la surface de la pièce.on commence le réglage de pression en compressions le ressort avec : 1mm donne 25.726 N

II.2.4 Choix de la matière des pièces

Notre outil est constitué de six pièces liées entre elles avec différentes liaisons.et chaque une de ces pièces avec une matière distinguée.

Les caractéristiques mécaniques de ce matériau :

	Re N/mm ²	Rm N/mm ²	Dureté
Acier XC 38	400	650	190 HB
Acier X8CrNiS18-9	480	800	250 HB
Bronze CuSn4P	345	180	95 HV

Tableau II.1Caractéristiques mécaniques des matériaux [22].

N°	Désignations	Matière	Fonction	Quantités	Liaison avec autre pièces
1	Vis de réglage	XC 35	assurer le maintien de ressort et règle-la pression de galetage	1	par serrage avec la tige
2	corps	XC35	Porte et protège les autres éléments	1	glissière avec la tige
3	ressort	Carde à piano	Fournis la pression nécessaire à l'opération et l'absorption des vibrations causée par la machine de tour.	1	Liaison complète avec la tête d'outil
4	Vis de réglage pression	/	éliminer la rotation de la tige	2	par filetage avec le corps
5	Manchon guide	Bronze CuSn4P	Assurer le mouvement de rotation de Mandrin support	1	par serrage avec le corps
6	Mandrin support	X8CrNiS18-9	Transmit la force de ressort à la partie active	1	par filetage avec la tête de l'outil
7	Tête de fixation de l'outil	XC35	Porter de roulement et la bille	1	par filetage avec le mandrin support
8	Couvercle de l'outil	XC35	Couvercle de bille	1	par filetage avec la tête de l'outil
9	Bille	100 Cr 6	joue le rôle d'un galet	1	par serrage avec le roulement
10	Roulement à une rangée de billes à contact oblique	/	Assurer le mouvement de rotation de la bille	1	par serrage avec la tête de l'outil

Tableau II.2 Caractéristiques mécanique de chaque pièce

II.3 Conception assisté par ordinateur (CAO)

II.3.2 Les avantages de la CAO

- Création et modélisation de l'objet 2D/3D.
- Manipulations diverses (modifications).
- Mise en plan. Cartouche. Nomenclature.
- Sauvegarde et archivage.
- Module d'analyse.

II.3.1 Définition de la CAO

La CAO n'est pas une science mais une technique qui s'appuie sur la mécanique et l'infographie.

Conception : imaginer et formuler des solutions pour remplir des fonctions définies a l'intérieur d'un ensemble de contrainte.

C'est un processus dans lequel figurent plusieurs caractéristiques :

- L'activité humaine est le fait d'un spécialiste de métier concerné (projeteur, dessinateur préparateur ...).
- Le dialogue Homme /Machine se fait en temps réel.
- Les informations échangées graphiques et alphanumériques.
- Les différentes applications de la CAO permettent de créer des objets en 2D ou 3D et de les visualiser en modèles filaires, surfaciques et volumiques.

Les modèles 3D sont établis par des méthodes dites des éléments finis ou des volumes finis, qui décompose la structure de l'objet à étudier en éléments simples (triangles, parallélépipèdes...). A partir de ces modèles numériques, des calculs exploitant les lois de la géométrie, de la physique et de la mécanique permettent de tester le comportement du produit à réaliser. Certains programmes de CAO peuvent faire évoluer l'objet dans l'espace et le visualiser selon différentes perspectives, ou modifier la taille, ou monter l'intérieur. Ou même fournir la liste des composants nécessaires à sa construction. Les programmes 3D de CAO, gros consommateurs de puissance de calcul pour les simulations, ils sont utilisés dans tous les services de recherche et de développement de nombreux métiers liés à l'industrie (automobile, aéronautique...). Mais également dans des applications nécessitant une représentation graphique fidèle de ce que l'on envisage de réaliser. Comme en architecture et dans le bâtiment. Aujourd'hui, les fonctionnalités Internet d'un logiciel de CAO permettent de mettre en ligne le catalogue des produits. D'échanger les données de conception au sein d'Internet de l'entreprise ou sur le Web. Le Web permet d'acheter et de télécharger auprès de fournisseurs d'application spécialisée des logiciels de CAO évolués pour un usage ponctuel.

II.3.3 Mode d'utilisation

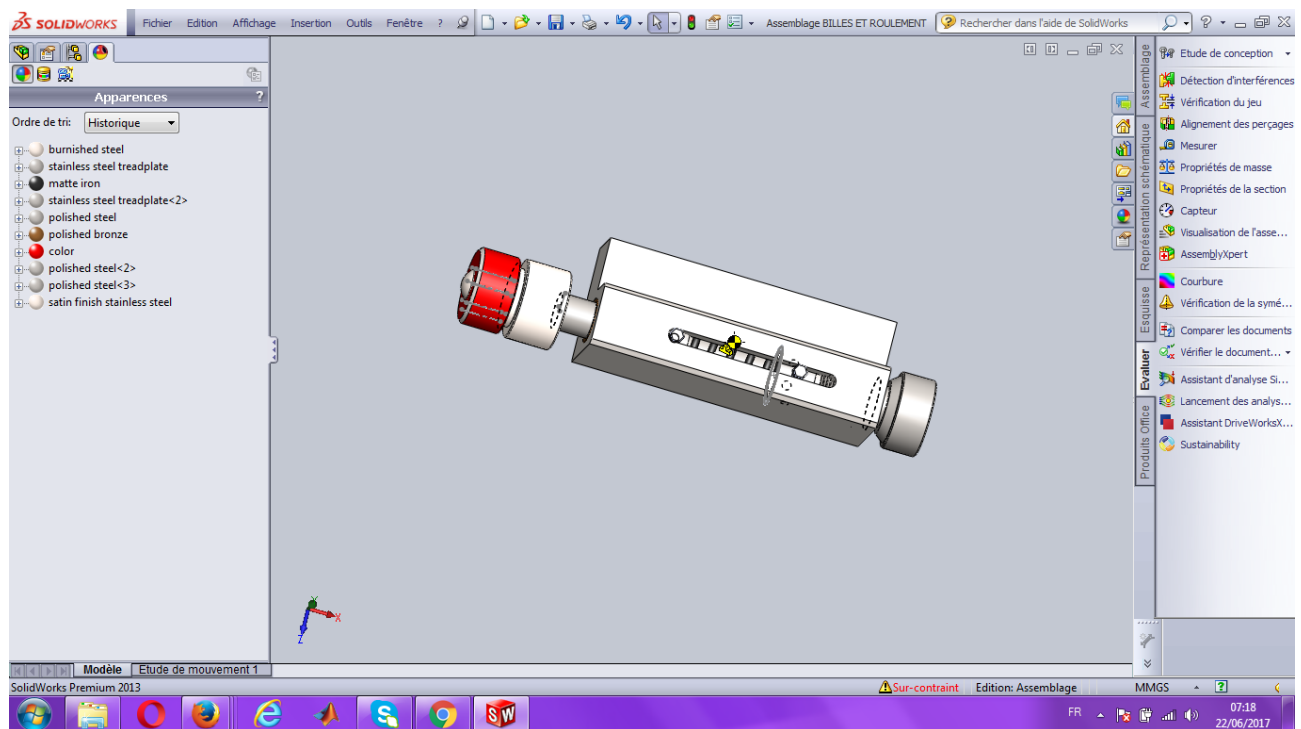
La CAO est une méthode de travail en temps réel et en mode interactif où l'utilisateur dialogue avec l'ordinateur pendant que celui-ci déroule son programme. Cette possibilité de piloter l'ordinateur entre deux séquences de calcul se réalise par actions combinées du logiciel et du matériel.

II.3.4 Description générale de SolidWorks

II.3.4.1 Définition de SolidWorks

C'est le premier système de CAO à offrir une approche de conception 3D native. Simple d'utilisation et facile à apprendre. Le SolidWorks offre les fonctionnalités les plus avancées dans le domaine de la modélisation de pièces. La définition de formes complexes, la création et la gestion de très gros assemblages et la mise en plan. SolidWorks offre un rapport puissance-prix qui permet un retour sur investissement très rapide.

II.3.4.2 L'écran graphique de SolidWorks



II.4 Etudes de résistance des matériaux de l'outil de Galetage

II.4.1 Introduction

Les différents calculs de résistance des matériaux peuvent être effectués selon plusieurs méthodes. Soit par des formules analytiques. Soit par discrétisation en éléments finis ou autres méthodes numériques. Dans notre étude une combinaison des méthodes de calcul suscitées sera utilisée selon le type de calcul à faire et selon le chargement subi par les pièces à étudier.

II.4.2 Ressorts de compression hélicoïdale

Les ressorts en métal peuvent être divisés en groupes selon plusieurs aspects. La division selon le type de charge et la conception structurale d'un ressort peut être considérée comme base.

Les types de ressort les plus courants sont décrits en détail comme suit:

- a) Ressorts pour une contrainte par des forces axiales (compression/tension) :
 - Ressorts hélicoïdaux (enroulés)
 - Ressorts de Belleville et ressorts à plaques
 - Ressorts annulaires
 - Ressorts bobinés
- b) Ressorts pour une contrainte par des forces transversales (flexion) :
 - Ressorts en lames
 - Ressorts incurvés
- c) Ressorts pour une contrainte par des couples :
 - Barres de torsion
 - Ressorts en spirale
 - Ressorts hélicoïdaux (enroulés)

II.4.2.1 Définition

Ce type de ressort. Encore appelé « ressort à boudin ou ressort de compression ». Peut être considéré comme une barre de torsion que l'on aurait enroulée en hélice. C'est sans doute le plus courant.

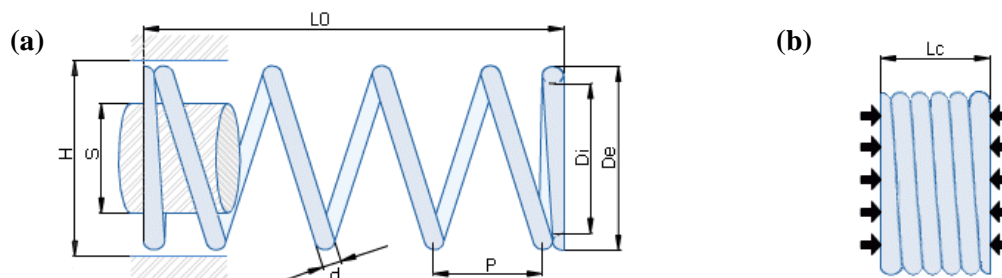


Figure II.1 Schéma d'un ressort hélicoïdal.

a) ressort à l'état libre .b) ressort à l'état comprimé complet

II.4.2.2 Fonction

Les ressorts jouent le rôle d'accumulateur d'énergie potentielle et le rôle de convertisseur d'énergie potentielle en énergie mécanique de translation ou de rotation.

II.4.2.3 Matériau

Corde à piano: NF A 47-301 de classe (SH). Température de fonctionnement entre (-30 et +120 °C).

Composition chimique					
C%	Si%	Mn%	Pmax	Smax	Cu max
0.5 – 1.00	0.1-0.31	0.5-1.22	0.02	0.025	0.12
Caractéristiques mécaniques					
Re		Rm		G	
920 N/mm ²		1225 N/mm ²		81500 N/mm ²	

Tableau II.3 Compositions chimique et caractéristiques mécanique du matériau NF A 47-301.

II.4.2.4 Paramètres physiques

La partie active du ressort comporte un fil enroulé selon une hélice régulière. mais il faut tenir compte des extrémités destinées à assurer la liaison. La figure II.1 ci-dessus représente un ressort de compression à extrémités rapprochées et meulées.

- **d (Diamètre du fil)** : ce paramètre donne l'épaisseur du fil utilisé pour produire le ressort.
- **S (Arbre)** : ce paramètre correspond au diamètre maximal de l'arbre pouvant être introduit dans le ressort. La tolérance concernant ce paramètre est de $\pm 0.35\%$.
- **D_i (Diamètre intérieur)** : le diamètre intérieur d'un ressort peut être calculé en soustrayant deux fois le diamètre du fil au diamètre extérieur du ressort. La tolérance concernant ce paramètre est de $\pm 0.35\%$.
- **D_e (Diamètre extérieur)** : le diamètre extérieur d'un ressort peut être calculé en ajoutant deux fois le diamètre du fil au diamètre intérieur du ressort. La tolérance concernant ce paramètre est de $\pm 0.35\%$ (indication).
- **H (Diamètre alésage)** : c'est le diamètre minimal de fonctionnement du ressort. La tolérance concernant ce paramètre est de $\pm 2\%$.
- **P (Pas)** : distance moyenne entre deux spires actives successives d'un ressort.
- **L_c (Longueur à bloc)** : longueur maximale du ressort après blocage complet. Ce paramètre est indiqué sur la figure II.3b. La tolérance concernant ce paramètre est de $\pm 0.93\%$.

- **L_n (longueur autorisée)** : longueur maximale autorisée d'un ressort après torsion. Si la déflexion est plus importante, il y a risque de déformation plastique (modification irréversible d'une forme en réponse à une force appliquée).
- **L_0 (Longueur libre)** : la longueur libre est mesurée à l'état non comprimé du ressort après un premier blocage (si nécessaire). La tolérance concernant ce paramètre est de $\pm 0.93\%$.
- **Nbre de spires** : nombre total de spires d'un ressort (fig II.2). Pour calculer le nombre de spires actives, il suffit de soustraire les deux spires des extrémités.
- **K (Raideur)** : ce paramètre détermine la résistance du ressort lors de sa compression. Elle est mesurée comme suit : $1 \text{ daN/mm} = 10 \text{ N/mm}$.

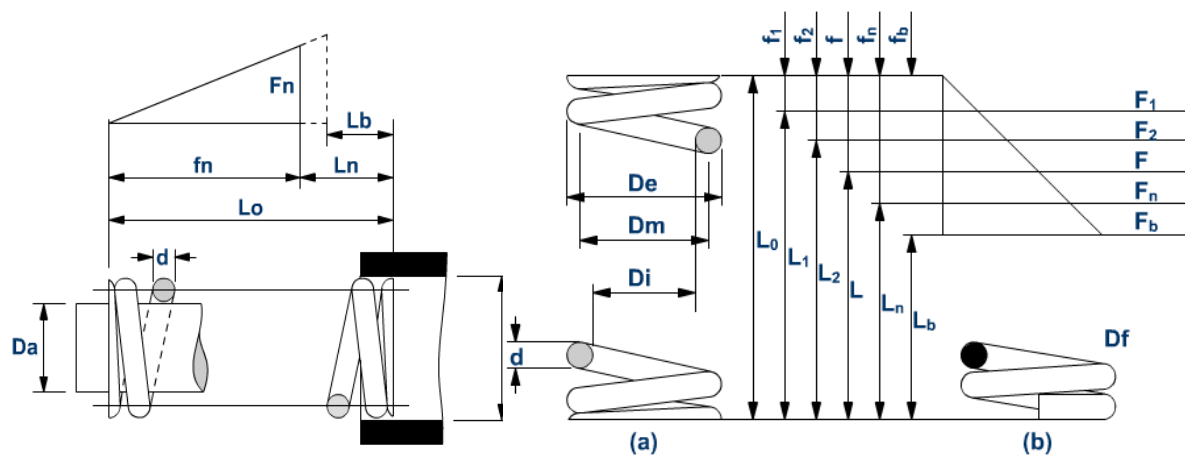


Figure II.2 Schéma de dimension de ressort compression

Dans les formules ci-dessus les divers symboles ont les significations suivantes:

- **F_1, F_2, F, F_n, F_b (Kgf)** : charges. à savoir les forces agissant dans le sens du ressort.
- **L_0 (mm)** : longueur libre. soit la longueur le long de son axe. le ressort n'est pas soumis à une charge.
- **L_1, L_2, L, L_n, L_b (mm)** : longueur du ressort soumise à des charges F_1, F_2, F, F_n, F_b correspondante.
- **f_1, f_2, f, f_n, f_b (mm)** : à savoir les différences entre la longueur libre L_0 et les longueurs L_1, L_2, L, L_n, L_b sous les charges F_1, F_2, F, F_n, F_b

Désignation	Symbole	Valeur
Diamètre du fil	d	3.00mm
Diamètre d'Arbre	S	14.30 mm
Diamètre intérieur	D _i	15.00 mm
Diamètre extérieur	D _e	21.00 mm
Diamètre moyenne	D _m	18.00 mm
Diamètre Alésage	D _f	21.90 mm
Nombre de spires utilisé	n _u	5.50 Spires
Longueur autorisée	L _n	25.04 mm
Longueur libre	L ₀	41.40 mm
Longueur à bloc	L _b	21.00 mm
Raideur	K	25.726 N/mm
Charge max. pour (L _n)	F _n	420.852 N
Masse totale du ressort	M _t	23.6972 g

Tableau II.4 Données de ressort [22].

II.4.2.5 Calcul statique :

Pour les ressorts dont les spires extrêmes sont jointe et meulées sur les trois quarts de leur longueur. Nous avons :

$$n_t = 1.5 + n_u \quad (\text{II. 1})$$

a) Calcul du nombre total de spires n_t

$$n_u \text{ (nombre de spires utilisé) } = 5.50 \text{ Spires}$$

$$\Rightarrow n_t = 1.5 + 5.5 = 7.00 \text{ Spires}$$

b) Calcul des distances minimales autorisées entre des spires Sa

$$S_a = L_n - L_b \quad (\text{II. 2})$$

$$\Rightarrow S_a = 25.04 - 21.00 = 4.04 \text{ mm}$$

c) Calcul la distance moyenne entre deux spires actives successives d'un ressort P.

$$P = \frac{L_0 - 1.5d}{n_u} \quad (\text{II. 3})$$

$$P = \frac{41.40 - (1.5 \times 3)}{5.50} = 6.70 \text{ mm}$$

d) Calcul la Course maximale (compression) S_n

$$S_n = L_0 - L_n \quad (\text{II. 4})$$

$$S_n = 41.40 - 25.04 = 16.36 \text{ mm}$$

e) Calcul des charges F_1, F_2, F, F_n, F_b

L_1 et F_1 (Longueur sous charge F) : $F_1 = (L_0 - L_1) \times K$. qui permet d'obtenir l'équation de la longueur L_1

$$L_1 = L_0 - F_1/K \quad (\text{II. 5})$$

La profondeur maximale de passe de l'outil de galetage est de ($\Delta L = L_0 - L_1 = 1.00 \text{ mm}$) et

$$L_0 = 41.4 \text{ mm.}$$

- L_1 : longueur du ressort soumise à des charges F_1

$$L_1 = 41.4 - 1.00 = 40.4 \text{ mm}$$

$$F_1 = (L_0 - L_1) \times K = (41.40 - 40.4) \times 25.726 = 25.726 \text{ N}$$

On pose :

$$L_2 = 40 \text{ mm}, L = 30 \text{ mm}$$

- L_2 : longueur du ressort soumise à des charges F_2

$$F_2 = (L_0 - L_2) \times K = (41.40 - 40) \times 25.726 = 36.0164 \text{ N}$$

- L : longueur du ressort soumise à des charges F

$$F = (L_0 - L) \times K = (41.40 - 30) \times 25.726 = 293.2764 \text{ N}$$

- L_n : longueur du ressort soumise à des charges F_n

$$F_n = (L_0 - L_n) \times K = (41.40 - 25.04) \times 25.726 = 420.852 \text{ N}$$

- L_b : longueur du ressort soumise à des charges F_b

$$F_b = (L_0 - L_b) \times K = (41.40 - 21) \times 25.726 = 524.810 \text{ N}$$

II.4.2.6 Calculs dynamique

Les formules approximatives pour le calcul des contraintes apparaissant dans les ressorts hélicoïdaux à faible pas se trouvant en compression ou en traction peuvent être établies à partir des efforts internes existant dans la section d'une spire. Efforts qui remplacent l'influence de la partie inférieure du ressort mentalement sectionnée. Sous l'effet d'une force transversale F et du moment de torsion égal au produit de l'effort de traction par le rayon moyen r_{moy} du ressort ; $M_t = F_{\text{max}} \times r_{\text{moy}}$; dans la section d'une spire apparaissent deux groupes de contraintes tangentielles ; les contraintes dues au cisaillement qu'on considère par convention. Comme uniformément réparties (Cisaillement technologique).

a) Calcul l'allongement ou le raccourcissement du ressort compression (Δl)

$$\Delta l = \frac{8 \times F_{\text{max}} \times n_t \times D_m^3}{G \times d^4} \quad (\text{II. 6})$$

$$\Delta l = \frac{8 \times 25.726 \times 7 \times 18^3}{81500 \times 3^4} = 1.27 \text{ mm}$$

b) Calcul le moment de torsion (M_t)

$$M_t = F_{\text{max}} \times \frac{D_m}{2} \quad (\text{II. 7})$$

$$M_t = 25.726 \times \frac{18}{2} = 231.54 \text{ N/mm}$$

c) Calcul la contrainte dues au cisaillement (τ_{cis})

$$\tau_{\text{cis}} = \frac{F_{\text{max}}}{A} = \frac{4F_n}{\pi d^2} \quad (\text{II. 8})$$

$$\tau_{\text{cis}} = \frac{4 \times 25.726}{\pi \times 3^2} = 1.21 \text{ N/mm}^2$$

d) Calcul la contrainte dues à la torsion dont la valeur maximale (τ_{tor}) :

$$\tau_{\text{tor}} = \frac{8 \times F_{\text{max}} \times D_m}{\pi \times d^3} \quad (\text{II. 9})$$

$$\tau_{\text{tor}} = \frac{8 \times 25.726 \times 18}{\pi \times 3^3} = 34.67 \text{ N/mm}^2$$

e) Calcul des contraintes suivant diverses méthodes [23]:

Les contraintes tangentielles étant constantes sur la section et les contraintes de torsion étant maximales à la périphérie de la section du fil. Les contraintes maximales dans le ressort seront situées en périphéries et valent.

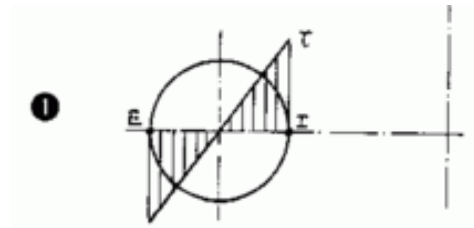


Figure II.3 Contrainte de torsion

Il faut examiner ici la répartition des contraintes dans le fil :

- Si nous ne tenons compte que du moment de torsion, les contraintes de cisaillement sont réparties comme l'indique la fig.II3 Elles sont maximales sur la périphérie du fil, où elles valent :
- Cette formule n'est guère utilisable que pour des avant-projets.
- Si nous prenons en compte l'effort tranchant, supposé uniformément réparti sur la section du fil, nous arrivons à la répartition indiquée par la fig. II.4.

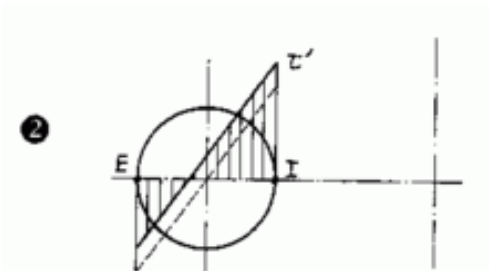


Figure II.4 Contrainte de cisaillement

Que le ressort travaille en traction ou en compression, les deux contraintes tangentielles s'ajoutent au point I situé à l'intérieur du ressort.

La correction faite est telle que :

- Le terme correcteur qu'il faut ajouter est d'autant plus grand que le rapport $m = D/d$ est petit, ce qui caractérise un ressort « raide ». Ceci sera justifié par la suite.
- En réalité, il faut encore tenir compte de la courbure de la « poutre » constituant le ressort.
- La répartition des contraintes n'est pas linéaire et prend l'allure donnée sur la fig. II.5, avec un maximum très marqué au point intérieur I où s'amorcent presque toujours les ruptures de fatigue.

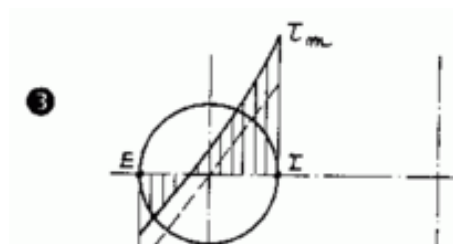


Figure II.5 Contrainte de torsion + Cisaillement + Fatigue de vibration

- **Calcul simpliste ne tenant compte que de la torsion ($K_r=1$)**

K_r (facteur de la correction de la tension en torsion)

$$\tau_{\max} = \tau_{\text{tor}} + \tau_{\text{cis}} \quad (\text{II. 10})$$

$$\tau_{\max} = 1.21 + 34.67 = 35.88 \text{ N/mm}^2$$

- **Calcul de proportions m**

$$m = \frac{D_m}{d} \quad (\text{II. 11})$$

$$m = \frac{18.00}{3} = 6$$

- **Calcul exact de K_r :**

$$K_r = \frac{4m - 1}{4m - 4} + \frac{0.615}{m} \quad (\text{II. 12})$$

$$\Rightarrow K_r = 1.25$$

$$\tau_{\max} = K_r \frac{8 \times F_{\max} \times D_m}{\pi \times d^3} \quad (\text{II. 13})$$

$$\tau_{\max} = 1.2525 \frac{8 \times 25.726 \times 18}{\pi \times 3^3} = 54.60 \text{ N/mm}^2$$

- **Calcul tenant compte de la torsion et du cisaillement K_r :**

$$K_r = 1 + \frac{d}{2D_m} \quad (\text{II. 14})$$

$$K_r = 1 + \frac{3}{2 \times 18} = 1.083$$

$$\tau_{\max} = K_r \frac{8 \times F_{\max} \times D_m}{\pi \times d^3}$$

$$\tau_{\max} = 1.083 \frac{8 \times 25.726 \times 18}{\pi \times 3^3} = 47.30 \text{ N/mm}^2$$

- **Calcul d'erreur relative entre les différentes formules :**

$$(1) \text{ et } (2) \text{ Erreur } (\%) = \left(1 - \frac{35.88}{54.60}\right) \times 100 = 34.28 \%$$

$$(1) \text{ et } (3) \text{ Erreur } (\%) = \left(1 - \frac{35.88}{47.30}\right) \times 100 = 24.14 \%$$

- **Calcul le coefficient de sécurité par rapport à la formule exacte (s) :**

$$\tau \leq 0.58 \frac{R_e}{s} \quad (\text{II. 14})$$

$$\Rightarrow s \leq 0.58 \frac{R_e}{\tau} \Rightarrow 0.58 \frac{920}{54.60} \leq 0.597 \Rightarrow s \leq 9.77$$

II.5 Etude de réaction des pièces de l'outil

le mandrin support est sollicité à la compression de contrainte.

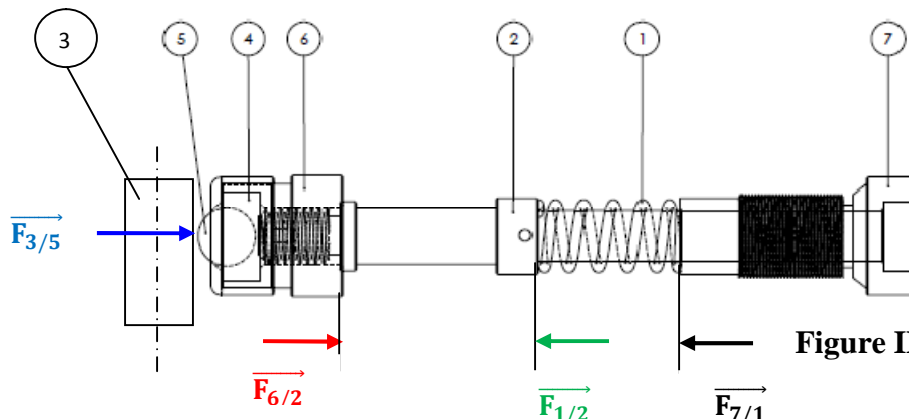


Figure II.6 Réaction des pièces

- 1 : Ressort ; 2 : Manchon support ; 3 : éprouvette ; 4:couvercle ; 5 : bille.6 : Tête de l'outil.
- 7 : vis de réglage

Les efforts appliqués sur la partie active de l'outil de galetage :

$$\|\vec{F}_{3/5}\| = \|\vec{F}_{6/2}\| = \|\vec{F}_{1/2}\| = \|\vec{F}_{7/2}\| = K \times \Delta L = 25.752 \times 1.00 = 25.726 \text{ N}$$

Dénomination		Euronorm : X8CrNiS18-9			AFNOR : Z8CNF18-09			
Finition		Acier rond de précision sans surépaisseur d'usinage.						
Composition chimique AFNOR : Z8CNF18-09 (valeur indicative en % du poids)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	N
0.09	0.95	1.56	0.040	0.25	16.00	9.00	0.77	0.11
Propriétés physique								
Dureté à la livraison				Max.250HB. recuit d'adoucissement				
Résistance à la traction Rm				800N/mm ²				
Dureté d'utilisation				Max .20 HRC				
Limite élastique				480 N/mm ²				
Coefficient de sécurité				2				
Applications possibles								
Industrie alimentaire. industrie de la photo. industrie de la peinture. industrie pétrolière. Industrie du savon. industrie papetière. industrie textile. construction mécanique en général. Pièce tournées.								

Tableau II.5 Caractéristiques de matériau [24].

▪ Calcul la résistance pratique en traction :

La Contrainte normale σ :

$$\sigma = \frac{4 F_{max}}{\pi d^2} = \frac{4 \times 25.726}{\pi \times 16^2} = 0.128 \text{ N/mm}^2$$

Pour un corps sollicité à la traction (compression) résiste en toute sécurité il faut que :

$$\sigma = \frac{4 F_{max}}{\pi d^2} \leq R_p \Rightarrow 0.128 \text{ N/mm}^2 < 240\text{N/mm}^2 \text{ .D'où la condition de résistance est vérifiée.}$$

II.6 Etude d'assemblages

II.6.1 Présentation

L'étude des assemblages vissés et leur dimensionnement sont parmi les études les plus complexes de la technologie.

La nature même des filetages les rend très hyperstatiques et Il est généralement très difficile et très délicat de connaître précisément les sollicitations qui s'exercent sur un ensemble vis-écrou.

II.6.2Caractéristiques géométriques

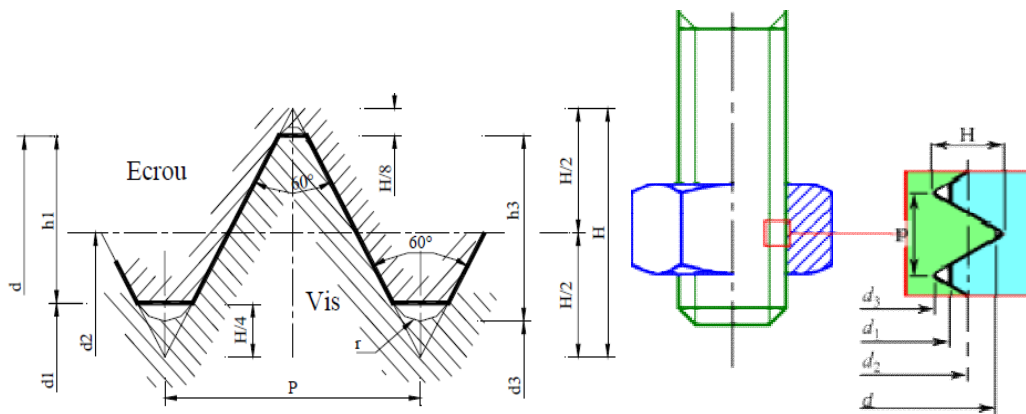


Figure II.7 Schéma de filets triangulaire (métrique ISO)

N°	Désignation	Symbole	L'équation de calcul	Unité
1	Diamètre nominal	D	/	mm
2	Pas	P	/	mm
3	Diamètre intérieur de l'écrou	d ₁	d - 1.0825 P	mm
4	Diamètre moyen	d ₂	d - 0.6495 P	mm
5	Diamètre du noyau	d ₃	d - 1.2268 P	mm
6	Hauteur du filet	H	0.866P	mm
7	Hauteur du filet de contact	h ₁	0.5412P	mm
8	Hauteur de vis	h ₃	0.6134P	mm

Tableau II.6 Profils d'assemblage [25].

II.6.3 Géométrie d'une vis :

Le filetage et le taraudage ont des formes hélicoïdales. Si l'on considère une hélice d'axe vertical de diamètre d₂ et de pas P, l'angle que fait la tangente avec l'horizontale vaut :

$$\alpha = \arctan \left(\frac{P}{\pi \times d_2} \right) \quad (II. 15)$$

Le diamètre à prendre en compte est le « diamètre d_2 sur flanc ». c'est-à-dire celui de la « fibre neutre ». Dans le cas du profil métrique ISO, le profil du filet est grosso modo un triangle équilatéral. le rapport entre le pas p et la hauteur H du profil est donc de $\sqrt{3}/2$. Soit $H \approx 0.866 \times p$. On laisse $\frac{1}{8}H$ de jeu entre la pointe extérieure du profil et l'extrémité réelle du filet de la vis, soit

$$d_2 = d + 2 \left(\frac{H}{8} - \frac{H}{2} \right) = d - \frac{3}{4}H = d - \frac{\sqrt{3}}{8} P \quad (\text{II.16})$$

Donc : $d_2 = d - 0.6495 P$

▪ Résistance de l'assemblage vissé

L'assemblage vissé présente trois modes de ruine (fig. II.8) :

- Arrachement du filet du taraudage ou de l'écrou (rupture en cisaillement).
- Arrachement du filet de la vis (rupture en cisaillement).
- Rupture de la vis (rupture en traction/torsion).
- Matage de la pièce sous la tête de vis
- (non représenté).

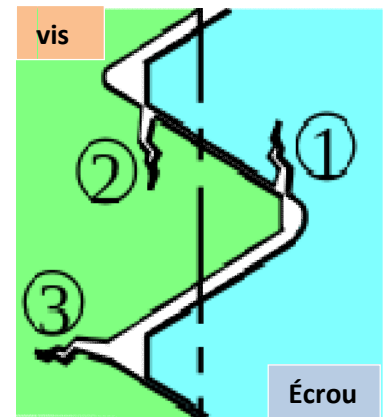


Figure II.8 Modes de ruine de l'assemblage vissé

▪ Résistance à l'arrachement des filets

Dans un premier temps, on peut évaluer le risque d'arrachement des filets.

Lorsque la charge augmente, les filets se déforment plastiquement, et la rupture est constatée sur tous les filets simultanément.

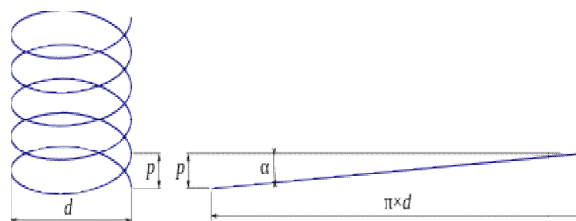


Figure II.9 Relation entre l'angle de diamètre et le pas de l'hélice

On prend donc en compte la totalité de la longueur engagée de la vis dans le taraudage :

- dans le cas d'un boulon, c'est la hauteur de l'écrou réduite des chanfreins : si un écrou a pour hauteur $0.8 \times d$, la longueur utile L_u vaut $0.6 \times d$
- dans le cas d'un trou taraudé, c'est l'implantation j

- En considérant que la surface cisailée est un cylindre
- côté vis. la rupture a lieu sur le diamètre d_1 (extrémité du filet de l'écrou) ; pour une vis ISO. $d_1 = d - 1.0825 \times p$. la hauteur cisailée étant les 3/4 de la hauteur totale ;
- côté écrou ou taraudage. la rupture a lieu sur un cylindre de diamètre d (diamètre nominal) ; pour un filetage ISO. la hauteur cisailée est les 7/8 de la hauteur totale.

Si la vis est en prise sur une longueur l_e (longueur engagée).alors les surfaces résistantes des filets ont pour aire :

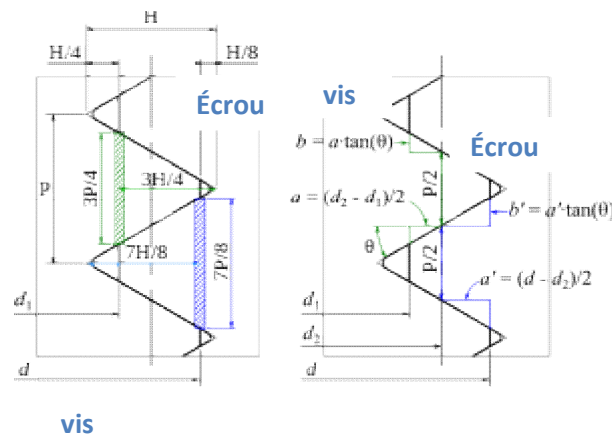


Figure II.10 Schéma de deux manières de calculer l'aire cisailée.

Une vis présente une section variante de manière brusque. On ne peut pas donc la modéliser par une poutre au sens strict. On définit cependant de manière conventionnelle un cylindre lisse ayant la même résistance. Son diamètre est appelé d_0 et défini. pour le profil ISO.

$$d_0 = d + 0.938 \ 2 \times p \tag{II. 17}$$

Dans le cas de vis en acier non-inoxydable. la résistance de l'acier est donnée par une « classe ». typiquement « 4.6 ». « 8.8 » ou « 10.9 ». Le premier nombre indique la résistance à la traction R_m en centaine de méga pascals et le second nombre indique la proportion que représente la limite d'élasticité R_e en dizaine de pour cent ; ainsi. un acier de « classe 4.6 » a un $R_m = 400$ MPa et un R_e valant 60 % du R_m . soit $R_e = 0.6 \times 400 = 240$ MPa[27].

Matériau	R _e (MPa)	Matériau	R _e (MPa)
Alliage d'aluminium	200	Fonte	240
EN AB 21000 (A-U5GT)		EN GJS 400-15 (FGS 400-15)	
Alliage d'aluminium	240	Vis classe 4.6	240
EN AW 2017 (A-U4G)			
Acier	235	Vis classe 8.8	640
S235			
Alliage d'aluminium	440	Vis classe 10.9	900
EN AW 7075 (A-Z5GU)			

Tableau II.7 Résistance en traction des matériaux courants [28].

Matériau	R _{eg} (MPa)	Matériau	R _{eg} (MPa)
Alliage d'aluminium	100	Fonte	192
EN AB 21000 (A-U5GT)		EN GJS 400-15 (FGS 400-15)	
Alliage d'aluminium	120	Vis classe 4.6	168
EN AW 2017 (A-U4G)			
Acier	117	Vis classe 8.8	512
S235			
Alliage d'aluminium	220	Vis classe 10.9	720
EN AW 7075 (A-Z5GU)			

Tableau II.8 Résistance en cisaillement des matériaux courants [28].

De manière générale :

- pour un acier doux (S235, vis de classe 3.6) ou un alliage d'aluminium. $R_{eg} = 0.5 \times R_e$;
- pour un acier mi-dur (vis de classe 4.6 à 6.8). $R_{eg} = 0.7 \times R_e$;
- pour un acier trempé (classe 6.9 et supérieure) ou une fonte : $R_{eg} = 0.8 \times R_e$.

II.6.4 Relation entre la force de traction et le couple de serrage

Localement, la situation de la vis qui tourne dans le taraudage est similaire à un solide glissant sur un plan incliné. On appelle \vec{F} la force d'action locale du taraudage sur la vis.

On se place à un endroit du filet et on définit un repère cylindrique local. L'hélice étant inscrite dans le cylindre : l'axe x est radial, l'axe y est tangentiel et l'axe z est l'axe du cylindre. Si l'on développe l'hélice, le plan développé est le plan (y, z).

Il n'y a pas de glissement « radial » (dans le plan (z, x)). Donc la force est dans un plan incliné de l'angle $\theta = 30^\circ$. L'angle du profil du filet, par rapport à z. À la limite du glissement, l'action de

contact du taraudage sur la vis se situe sur le cône d'adhérence. donc fait un angle φ avec la normale au plan de glissement ; on a :

$$\varphi = \arctan(\mu) \quad (\text{II. 18})$$

où μ est le coefficient d'adhérence.

Pour un contact acier-acier. On a typiquement $\mu = 0.18$ (non lubrifié) ou 0.12 (lubrifié).

Donc : $\varphi = 10.2^\circ$ (non lubrifié) ou 6.84° (lubrifié) [29].

Mais les coefficients présentent une grande variabilité : selon le traitement de surface (en général traitement anticorrosion). La lubrification. Mais aussi une grande dispersion pour des conditions données. La pression admissible dépend du matériau. Mais il est difficile d'avoir des données. Pour les aciers de construction. On retient en général $P_{adm} = 20$ MPa. Guillot propose lui des valeurs bien plus élevées (avec une bonne sécurité).

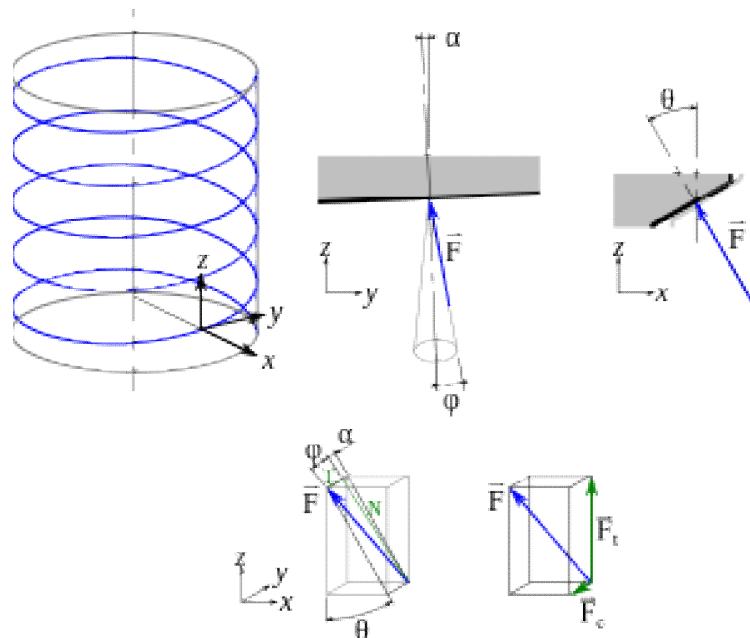


Figure II.11 Action de contact sur un filet ISO

Traitement de surface		$\mu (\varphi)$		
Vis	Écrou	Non lubrifié	Huilé	Graissé au MoS ₂
Phosphatée	Aucun	0.14-0.21	0.14-0.17	0.10-0.11
		(7.97-11.9°)	(7.97-9.65°)	(5.71-6.28°)
Galvanisé 8 μm (électrozingué)	aucun	0.13-0.18	0.13-0.17	/
		(7.41-10.2°)	(7.41-9.65°)	/
	Galvanisé 5 μm	0.13-0.18	0.14-0.19	/
		(7.41-10.2°)	(7.97-10.8°)	/
Cadmié 7 μm	aucun	0.08-0.12	0.08-0.11	/
		(4.57-6.84°)	(4.57-6.28°)	/
	Cadmié 7 μm	0.08-0.12	0.10-0.15	/
		(4.57-6.84°)	(5.71-8.53°)	/

Tableau II.9 Coefficients de frottement acier sur acier selon la finition et la lubrification.

La force peut ensuite se décomposer en :

- une composante axiale F_t , qui met la vis en traction ;
- une composante horizontale F_c , qui produit un couple résistant.

On se place au milieu du filet, donc au diamètre sur flanc d_2 . On a donc:

$$F_t = F \times \cos(\alpha \pm \varphi) \times \cos(\theta) \quad (\text{II. 19})$$

$$\vec{F}_c = \begin{pmatrix} -F \times \cos(\alpha \pm \varphi) \times \sin(\theta) \\ F \times \sin(\alpha \pm \varphi) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II. 20})$$

Le moment de la force par rapport à l'axe vaut :

$$\vec{M}_1 = \vec{R} \wedge \vec{F}_c \quad (\text{II. 21})$$

$$\vec{M}_1 = \begin{pmatrix} d_2/2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -F \times \cos(\alpha \pm \varphi) \times \sin(\theta) \\ F \times \sin(\alpha \pm \varphi) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{d_2}{2} \times F \times \sin(\alpha \pm \varphi) \end{pmatrix}$$

Ce moment M_1 est une composante du couple de serrage. On peut éliminer F pour mettre en relation F_t et M_1 (en scalaire) :

$$M_1 = d_2 \times F_t \times \frac{\tan(\alpha \pm \varphi)}{2 \cos(\theta)} \quad (\text{II. 22})$$

II.4.5 Calcul des assemblages par filetage :

a) Hypothèse de calcul :

Nous admettons l'hypothèse simplificatrice suivante :

- La charge appliquée à un assemblage fileté est uniformément répartie sur tous les filets en prise.
- La section on droite d'une tige fileté est admise circulaire de diamètre (d_1) à l'extension on à la compression.

b) Assemblage statique :

L'assemblage est dit statique. Lorsque la tige filetée est immobile par rapport à la pièce taraudé.

- Résistance à la traction de la tige filetée :

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{\frac{\pi d_1^2}{4}} \leq R_{p_{\text{vis}}} \quad (\text{II. 23})$$

- Résistance au cisaillement des filets de vis :

$$\tau_{\max} = \frac{F_{\max}}{\pi \times d_1 \times h} \leq R_{p_{\text{gvis}}} \quad (\text{II. 24})$$

$$h^* = \frac{h}{k}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k = 1 \text{ filet traingulaire} \\ k = 1.35 \text{ filet trapezoidal} \\ k = 2 \text{ filet carré} \end{array} \right.$$

h^* : hauteur réduite

$h = n \times p$: Hauteur de la partie entre tige filetée et pièce taraudé.

n :Nbr de fils en prise.

Si on considère que :

$$\sigma_{\max} = \tau_{\text{vis}}$$

$$\Rightarrow \frac{4F}{\pi \times d_1^2} \geq \frac{F}{\pi \times d_1 \times n \times p}$$

$$\Rightarrow \frac{4}{d_1} \geq \frac{k}{n \times p} \Rightarrow n \geq \frac{k \times d_1}{4 \times p}$$

- Résistance au cisaillement des filets de l'écrou :

$$\tau_{\max} = \frac{F_{\max}}{\pi \times d \times h} \leq R_{p_{\text{gécrou}}} \quad (\text{II. 25})$$

- Résistance à la compression des filets :

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{\pi \times d_2 \times t \times n} \leq [P_s]_{\min}(\text{tig. écrou}) \quad (\text{II. 26})$$

$$t = \frac{d - d_1}{2}$$

- Le moment C_m nécessaire pour remonter :

$$C_m = F_{\max} \times \frac{d_2}{2} \times \tan(\alpha + \varphi') \quad (\text{II. 27})$$

$$\alpha = \arctan \frac{p}{\pi \times d_2}$$

$$\varphi' = \arctan \frac{\mu}{\cos\theta}$$

- Le moment C_m nécessaire pour la faire descendre :

$$C_m = F_{\max} \times \frac{d_2}{2} \times \tan(\alpha - \varphi') \quad (\text{II. 28})$$

- La contrainte maximale dans la vis :

$$\sigma_{\max} \leq R_{p(\text{vis})} \quad (\text{II. 29})$$

$$\sigma_{\max} = K_t \times \sigma_{\text{éq}} \quad (\text{II. 30})$$

Effet de F_{\max} (force de serrage) :

$$\sigma = \frac{4 F_{\max}}{\pi d_1^2} \quad (\text{II. 31})$$

Effet de C_m (moment de serrage) :

$$\tau = \frac{16 C_m}{\pi d_1^3} \quad (\text{II. 32})$$

et conditions de résistance (le matériau de la vis est ductile):

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{éq}} \times K_t = K_t \times \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq R_{p(\text{vis})}$$

$$R_p = R_e / s \quad (\text{II. 33})$$

$$R_{pg} = R_{eg} / s \quad (\text{II. 34})$$

$$R_{eg} = 0.8 \times R_e$$

R_{pg} : La résistance pratique au cisaillement.

R_{pe} : Résistance pratique en traction.

R_{eg} : Résistance élastique au cisaillement.

- Le rondement d'un assemblage fileté:

$$\eta = \frac{F_{\max} \times p}{C_m \times 2\pi} s \quad (\text{II. 35})$$

Mandrin support		Tête de fixation		
Matériau		Matériau		XC38
X8CrNiS18-9				
N°	Désignation	Symbole	Résultat	Unité
1	Diamètre nominal	d	16	mm
2	Pas	p	1.5	mm
3	Coefficient de sécurité	s	2	/
4	Facture de concentration de contrainte	Kt	2.5	/
5	Coefficient de filet triangulaire	k	1	/
6	Limite élastique	R _e	480	N/mm ²
7	Résistance élastique en traction	R _m	800	N/mm ²
8	La pression admissible	P _{adm}	20	N/mm ²
9	Rayon à fond de filet	r	0.216	mm
10	Diamètre de trou	d ₀	17.407	mm
11	Diamètre intérieur de l'écrou	d ₁	14.376	mm
12	Diamètre moyen	d ₂	15.188	mm
13	Diamètre du noyau	d ₃	14.159	mm
14	Hauteur du filet	H	1.299	mm
15	Hauteur du filet de contact	h ₁	0.811	mm
16	Hauteur de vis	h ₃	0.920	mm
17	Hauteur de la partie entre tige filetée et pièce taraudé	h	3.594	mm
18	Hauteur réduite	h*	3.594	mm
19	Nbr de filets en prise	n	2.396	mm
20	L'angle de l'hélice	α	1.80	°
21	Angle du profil du filet	θ	30	°
22	Coefficient d'adhérence acier/acier	μ	0.12	/
23	Angle normale au plan de glissement	φ'	7.80	°
24	Section nominale	A	201	mm ²
25	Section résistante	A _s	169	mm ²
26	Effort maximal de traction	F _{max}	25.726	N
27	Résistance à la traction de la tige filetée	σ _{max}	0.026	N/mm ²
28	Résistance au cisaillement des filets de vis	τ _{max}	0.159	N/mm ²
29	Résistance au cisaillement des filets de l'écrou	τ' _{max}	0.142	N/mm ²
30	Résistance à la compression des filets	σ' _{max}	0.026	N/mm ²
31	Le moment C _m nécessaire pour remonter	C _{m1}	228.577	N.mm
32	Le moment C _m nécessaire pour la faire descendre	C _{m2}	-19.536	N.mm
33	Le rondement d'un assemblage fileté	η	5.377	%
34	La résistance élastique au cisaillement	Reg	384	N/mm ²
35	La résistance pratique en traction	Rp	240	N/mm ²
36	La résistance pratique au cisaillement	Rpg	192	N/mm ²
Résultats et conclusion				
Effort maximal de traction F_{max} = 25.726 N		Le moment C_m = 228.577 N. mm		
La Contrainte normale σ		Conditions de résistance : $\sigma_{max} = K_t \times \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq Rp_{(vis)}$ $\sigma_{max} = 1.997 < 240$ $\Rightarrow \text{La vis résiste}$		
$\sigma = \frac{4 F_{max}}{\pi d_1^2} = 0.159 \text{ N/mm}^2$				
La Contrainte tangentielle τ				
$\tau = \frac{16 C_m}{\pi d_1^3} = 0.392 \text{ N/mm}^2$				

Tableau II.10 Etat de calcul d'assemblage (mandrin support et tête de fixation)

Vis de réglage		Corps			
Matériau		XC38		Matériau	XC38
N°	Désignation	Symbole	Résultat	Unité	
1	Diamètre nominal	d	24	mm	
2	Pas	p	1.5	mm	
3	Coefficient de sécurité	s	2	/	
4	Facture de concentration de contrainte	Kt	2.5	/	
5	Coefficient de filet triangulaire	k	1	/	
6	Limite élastique	R _e	400	N/mm ²	
7	Résistance élastique en traction	R _m	650	N/mm ²	
8	La pression admissible	P _{adm}	20	N/mm ²	
9	Rayon à fond de filet	r	0.216	mm	
10	Diamètre de trou	d ₀	25.407	mm	
11	Diamètre intérieur de l'écrou	d ₁	22.376	mm	
12	Diamètre moyen	d ₂	23.188	mm	
13	Diamètre du noyau	d ₃	22.159	mm	
14	Hauteur du filet	H	1.299	mm	
15	Hauteur du filet de contact	h ₁	0.811	mm	
16	Hauteur de vis	h ₃	0.920	mm	
17	Hauteur de la partie entre tige filetée et pièce taraudé	h	5.594	mm	
18	Hauteur réduite	h*	5.594	mm	
19	Nbr de filets en prise	n	3.729	mm	
20	L'angle de l'hélice	α	1.140	°	
21	Angle du profil du filet	θ	30	°	
22	Coefficient d'adhérence acier/acier	μ	0.12	/	
23	Angle normale au plan de glissement	φ'	7.400	°	
24	Section nominale	A	452	mm ²	
25	Section résistante	A _s	404	mm ²	
26	Effort maximal de traction	F _{max}	25.726	N	
27	Résistance à la traction de la tige filetée	σ _{max}	0.007	N/mm ²	
28	Résistance au cisaillement des filets de vis	τ _{max}	0.065	N/mm ²	
29	Résistance au cisaillement des filets de l'écrou	τ' _{max}	0.061	N/mm ²	
30	Résistance à la compression des filets	σ' _{max}	0.007	N/mm ²	
31	Le moment C _m nécessaire pour remonter	C _{m1}	343	N.mm	
32	Le moment C _m nécessaire pour la faire descendre	C _{m2}	-29.827	N.mm	
33	Le rondement d'un assemblage fileté	η	3.580	%	
34	La résistance élastique au cisaillement	Reg	320	N/mm ²	
35	La résistance pratique en traction	Rp	200	N/mm ²	
36	La résistance pratique au cisaillement	Rpg	160	N/mm ²	
Résultats et conclusion					
Effort maximal de traction F _{max} = 25.726 N			Le moment C _m = 343 N. mm		
La Contrainte normale σ			Conditions de résistance : $\sigma_{max} = K_t \times \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq Rp_{(vis)}$ $\sigma_{max} = 0.810 < 200$ $\Rightarrow \text{La vis résiste}$		
$\sigma = \frac{4 F_{max}}{\pi d_1^2} = 0.065 \text{ N/mm}^2$					
La Contrainte tangentielle τ					
$\tau = \frac{16 C_m}{\pi d_1^3} = 0.156 \text{ N/mm}^2$					

Tableau II.11 Etat de calcul d'assemblage (Vis de réglage et corps)

II.7 Bille et roulement

II.7.1 Bille

II.7.1.1 Définition et principe

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 du 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 (figure II.10).

R : rayon de la bille

d : diamètre de la pièce

Δd : déformation restante R_{ent} -hauteur de rugosité de la surface de départ

R : hauteur de rugosité après Repassage

P_1 : pression longitudinale

P_t : pression transversale

α : angle de contact la bille et la pièce

R_a : rugosité de tournage

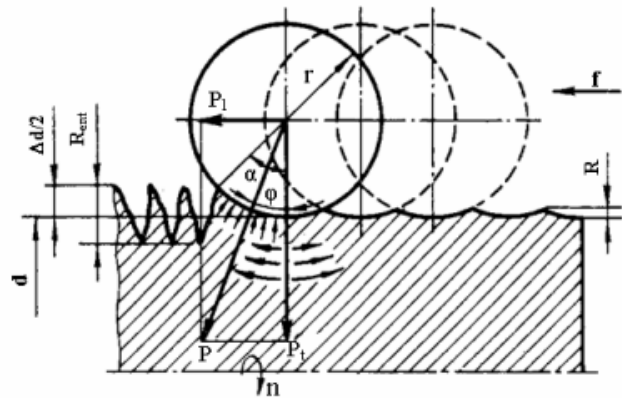


Figure II.12 Schéma de la déformation des irrégularités de surface lors d'un traitement par bille [27]

La couche superficielle s'écoule sous l'influence de la force de pression développée par la bille, par conséquent les parties en saillies se déplacent vers les creux, la hauteur des irrégularités d'entrée « R_{ent} » diminue. Le métal à partir des creux est pressé vers le haut. Un nouveau relief apparaît avec des hauteurs « R » accompagné de pas qui sont conditionnés par les régimes de traitement.

Les projections de la résultante « P » dans les directions des efforts P_1 et P_2 sont données par les expressions :

$$P_1 = \int_0^{\alpha} \sigma \cos \alpha \, dF \quad (\text{II. 36})$$

$$P_2 = \int_0^{\alpha} \sigma \sin \alpha \, dF \quad (\text{II. 37})$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\int_0^{\alpha} \sigma \sin \alpha \, dF}{\int_0^{\alpha} \sigma \cos \alpha \, dF} \quad (\text{II. 38})$$

De l'expression (II.38). on peut en déduire que. Pour un angle de contact « α » réduit caractérisant plusieurs cas de traitement de finition par déformation. la grandeur $\frac{P_2}{P_1}$ est faible ($\sin(\alpha) \rightarrow 0$ et $\cos(\alpha) \rightarrow 1$). Du même schéma de la fig. II.12. on peut en déduire que la résultante « P » est déviée de la direction d'action de l'effort « P_1 » suivant un angle « φ » avec :

$$\tan(\varphi) = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\int_0^\alpha \sigma \sin \alpha dF}{\int_0^\alpha \sigma \cos \alpha dF} \quad (\text{II.39})$$

La résultante « P » passe par le centre de la bille dans les limites de l'angle « α ». $\varphi \in [0, \alpha]$.

Dans le cas extrême. Lorsque « φ » est proche de « 0 ». de l'expression (II.39) nous obtenons ($P_2 \approx 0$). ce qui correspond au schéma de traitement avec avance transversale. C'est le cas du traitement de renforcement par galet ou par bille. L'absence dans ce cas des déformations par glissement suivant l'axe de direction. Participe à la création des meilleures conditions de déformations plastiques permettant d'atteindre un degré supérieur de polissage (glaçage de la surface).

Dans l'autre cas extrême où ($\varphi \rightarrow \alpha$). le rapport $\frac{P_2}{P_1}$ est significatif. Pour atteindre un niveau élevé de polissage lors du traitement avec avance longitudinale. il est nécessaire d'avoir un rapport $\frac{P_2}{P_1}$ minimal. Cette condition s'obtient par une bille de grand diamètre ou galet de rayon de sphère important et avec de faibles avances.

La rugosité des surfaces obtenue par ces traitements (en particulier par galetage à la bille et au galet) diffère de celle réalisée par usinage (à l'outil ou à l'abrasif). La rugosité transversale. Mesurée dans la direction perpendiculaire à la direction du traitement (sens de l'avance) est nettement inférieure à celle obtenue par usinage. Les principaux facteurs qui déterminent la rugosité transversale sont liés à la forme géométrique et la dimension des éléments déformant. Ainsi que la valeur de l'avance.

Lors de la déformation. les couches internes du métal s'opposent à la déformation des couches externes et les soumettent à des contraintes de compression qui renforcent les couches déformées du métal. Après plastification et déchargement du métal. la surface se trouve en compression. La contrainte de compression est maximale au centre de l'empreinte puis décroît sur les bords de celle-ci. Ce type d'empreinte est multiplié par l'action du mouvement d'avance de l'outil.

II.7.1.2 Calcul de résistance

a) Caractéristiques techniques de matériau de la bille :

- Dimension de bille : $\varnothing = 16.64$ mm

AFNOR	Compositions chimique						
100C6	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
	0.95 -1.1	0.15 -0.35	0.2 -0.4	≤ 0.0025	≤ 0.0015	1.35 -1.6	≤ 0.1
	Propriétés mécanique						
	Rr (N/mm ²)	Re (N/mm ²)		E (N/mm ²)		Dureté HB	
	850 à 1250	550 à 850		210000		≤ 217	

Tableau II.12 Caractéristiques de matériau.

b) Calcul du diamètre de l'empreinte d :

Une pénétration suffisamment dure pour ne pas être déformation par le matériau à essayer. et de forme variable. Est enfoncé dans le métal par l'action d'une force constante appliquée dans des conditions bien définies. On mesure soit les dimensions transversales. Soit la profondeur de l'empreinte de bille.

Au contact d'une bille sur la pièce. La répartition des contraintes et des déformations. si la limite d'élasticité n'est pas dépassée. Est donnée par Hertz. Si la bille a un diamètre D et que la charge qui lui est appliquée vaut F. le diamètre d de l'aide de contact vaut :

$$d = \left(\frac{(1 - \nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2} \right)^{1/3} (3FD)^{1/3} \quad (\text{II. 40})$$

ν_1 : coefficient de poisson de la bille ($\nu_1=0.3$)

ν_2 : coefficient de poisson de la pièce ($\nu_2=0.3$)

E_1 : Module de Yong de la bille (210000N/mm²)

E_2 : Module de Yong de la pièce (210000N/mm²)

F= 25.726 N (la force maximal)

D= 16.64 mm (diamètre de bille)

Donc :

d = 0.21 mm

c) Calcul la contrainte moyenne σ_{moy}

$$\sigma_{\text{moy}} = \frac{-4F}{\pi d^2} \quad (\text{II. 41})$$

Donc la contrainte moyenne sur l'aide de contact vaut ; $\sigma_{\text{moy}} = -742,75 \text{ N/mm}^2$ et la contrainte maximale au centre de cette aire est telle que :

$$\sigma_{\text{max}} = 1.5 \times \sigma_{\text{moy}} = -742.75 \times 1.5 = -1114,12 \text{ N/mm}^2$$

d) Calcul la rugosité de tournage

$$R_a = \frac{f^2}{R_\epsilon 18\sqrt{3}} \quad (\text{II. 42})$$

R_ϵ : Rayon de bec de l'outil (plaquette carbure DNMG 15-06-12)

f : l'avance de l'outil (0.23 mm/tour)

$$R_a = 1.41 \mu\text{m}$$

e) Calcul la rugosité therique de l'operation de galetage

$$R_{a\text{th}} = \frac{f^2}{18 \frac{D}{2} \sqrt{3}} \quad (\text{II. 43})$$

D : diamètre de bille

f : l'avance de l'outil (0.05 - 0.1 - 0.15 mm/tour)

- $f = 0.05 \text{ mm/tour} \Rightarrow R_{a\text{th}} = 0.1 \mu\text{m}$
- $f = 0.1 \text{ mm/tour} \Rightarrow R_{a\text{th}} = 0.3 \mu\text{m}$
- $f = 0.15 \text{ mm/tour} \Rightarrow R_{a\text{th}} = 0.8 \mu\text{m}$

f) Calcul du taux de recouvrement

La bille de cet outil a un diamètre de 16.64 mm. et l'effort maximum admissible est $F = 25.726 \text{ N}$. La dureté Brinell est d'environ $HB = 120$. Cela permet de calculer la largeur de contact d . donc la rugosité R_a théorique maximale que l'on peut atteindre en conservant un taux de recouvrement $C\%$ supérieur à 0 (c'est à dire pour $f \leq d$. voir équation II. 44).

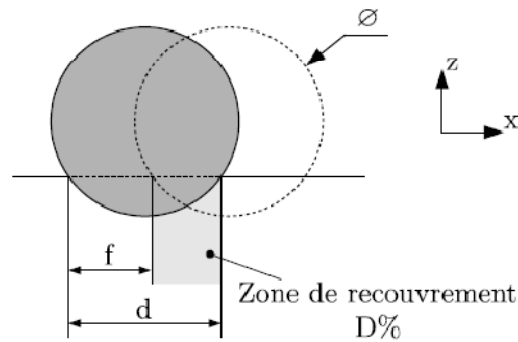


Figure II.13 Illustration de la zone de recouvrement de la bille de galetage.

$$C\% = 100 \frac{d - f}{d} \quad (\text{II. 44})$$

Et largeur de contact d' ;

$$HB = \frac{2F}{g\pi D(D - \sqrt{D^2 + d^2})} \quad (\text{II. 45})$$

L'accélération de la pesanteur ; $g=9.81 \text{ m/s}^2$

Donc :

La largeur de contact $d' = 0.17 \text{ mm}$ et taux de recouvrement $C\% = 11.76$

II.7.2 Roulement

II.7.2.1 Introduction

Dans les roulements à une rangé de billes à contact oblique.les pistes de roulement des bagues intérieure et extérieure sont décalées l'une par rapport à l'autre sur l'axe du roulement. Ainsi. Elles peuvent supporter des charges combinées. C'est-à-dire des charges radiales et axiales qui agissent en même temps.

La capacité de charge axiale des roulements à billes à contact oblique augmente avec l'angle de contact de 40° .L'angle de contact correspond à l'angle entre la ligne d'action de la charge. qui joint les points de contact de la bille et les pistes du roulement dans un plan radial. et une ligne perpendiculaire à l'axe du roulement.

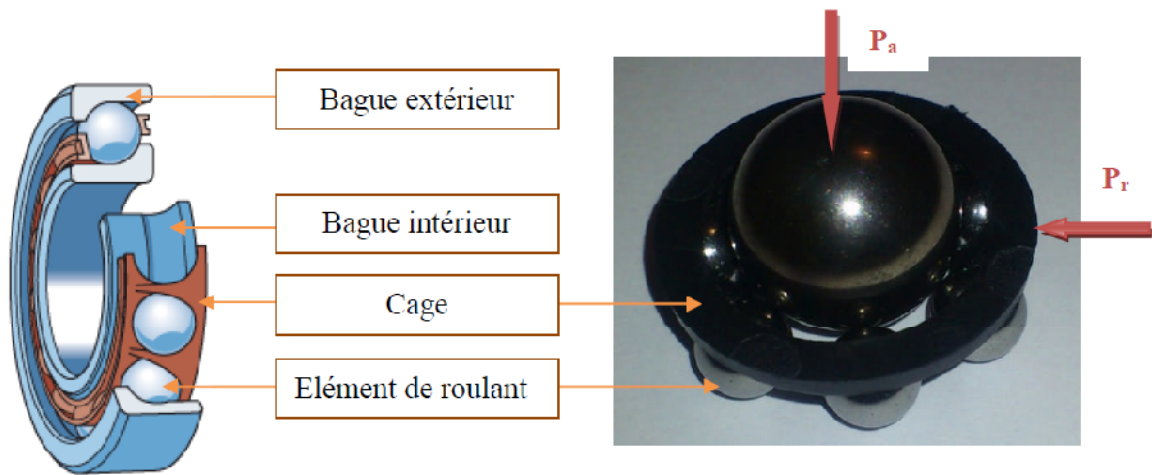


Figure II.14 Roulements à une rangé de billes à contact oblique

II.7.2.2 Calcul de résistance

a) Calcul déformation élastique dans le roulement

- d = 12mm (le diamètre intérieur de roulement)
- D = 32mm (le diamètre extérieur de roulement)
- B = 10mm (la longueur de roulement)
- r = 0.6 mm (le congé)
- C₀ = 3800 N (la charge statique de base)
- C = 7610 N (la charge dynamique de base)
- N = 2600 tr/min (la vitesse de rotation maxi)
- P_a = 25.726 N (la charge axial sur roulement)
- P_r = 0 N (la charge radial sur roulement)
- α = 40° (l'angle de contact)

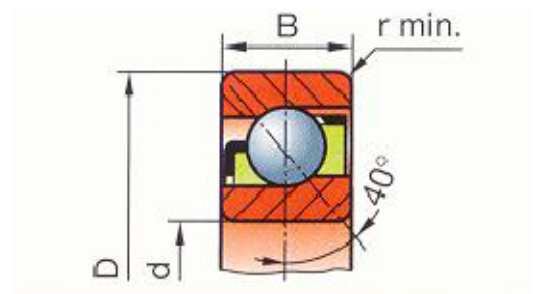


Figure II.15 Dimension de roulement

$$\delta_r = \left(\frac{0.002}{\cos \alpha} \right)^3 \sqrt[3]{\frac{Q^2}{D_w}} \tag{II. 46}$$

Q: Charge maximale sur élément roulants en daN

D_w: diamètre d'élément roulant en mm (6.34 mm)

α: angle de contact (40°)

$$Q = \frac{P_a}{z \sin \alpha} \tag{II. 47}$$

z :Nombre d'éléments roulants dans le roulement(z = 7)

$$Q = \frac{2.57}{7 \sin 40} = 0.57 \text{ daN}$$

$$\delta_r = \left(\frac{0.002}{\sin 40} \right)^3 \sqrt{\frac{0.57^2}{6.34}} = 1.1 \text{ } \mu\text{m}$$

b) Vitesse de rotation N_1

$$P_a \geq k \left(\frac{N}{1000} \right)^2 \times \left(\frac{C_0}{1000} \right)^2 \quad (\text{II. 48})$$

K : facteur (0.3 pour les roulements à bille à contact oblique séries 72B)

$$\Rightarrow N_1 \leq \sqrt{\frac{P_a \times 1000^4}{k \times C_0^2}} = \sqrt{\frac{2.57 \times 1000^4}{0.3 \times 3800^2}} = 770.23 \text{ tr/min} < 2600 \text{ tr/min}$$

$\Rightarrow N_1 < N$ Le roulement résistant

c) Couple de frottement de roulement

Tous les coefficients de frottement se rapportent au demi-diamètre d'alésage du roulement. Des valeurs plus élevées sont applicables pour les roulements neufs ; en cas de mise en marche et lorsque les roulements sont lubrifiés trop abondamment ou que la viscosité du lubrifiant est trop élevée.

$$M = \mu_F \times P_a \times \frac{d}{2} \quad (\text{II. 49})$$

$\mu_F = 0.0014$ (Le coefficient de frottement)

P_a : Charge sur le roulement en daN

d : Diamètre d'alésage du roulement en mm

$$M = 0.0014 \times 2.57 \times \frac{12}{2} = 0.02 \text{ mm. daN}$$

d) perte par frottement de roulement

Les pertes par frottement doivent être déterminées de façon plus précise. on obtient des valeurs acceptables en basant sur le couple total.

$$W_F = 0.001 \times M \times N_1 \quad (\text{II. 50})$$

M : Couple de frottement total en mm .daN

N : vitesse de rotation en tr/min

$$M = M_0 + M_1$$

Avec M_0 : couple en vide en mm .daN

M_1 : Couple en charge en mm .daN

On tire M_0 des formules ci-dessous :

$$\text{Si } \mathcal{V} \times N_1 \geq 2000 . M_0 = \mathcal{F}_0 \times 10^{-8} (\mathcal{V} \times N)^{2/3} \times d_m^3$$

$$\text{Si } \mathcal{V} \times N_1 < 2000 . M_0 = \mathcal{F}_0 \times 160 \times 10^{-8} \times d_m^3$$

\mathcal{V} : La viscosité de l'huile à la température de fonctionnement ($\mathcal{V} = 3$)

N_1 : vitesse de rotation en tr/min (770.23 tr/min)

$$\mathcal{V} \times N_1 = 770.23 \times 3 = 2310.60 > 2000 \Rightarrow M_0 = \mathcal{F}_0 \times 10^{-8} (\mathcal{V} \times N)^{2/3} \times d_m^3$$

\mathcal{F}_0 :Facteur déplacement de la construction de roulement et du mode de lubrification

$\mathcal{F}_0 = 4$ (Roulements à bille à contact oblique)

d_m : Diamètre moyen du jeu d'éléments roulants en mm

$$d_m = 22 \text{ mm}$$

$$M_0 = 4 \times 10^{-8} (2310.60)^{2/3} \times 22^3 = 0.07 \text{ mm} \cdot \text{daN}$$

Dans les roulements chargés, à faible vitesse. Les pertes sont provoquées essentiellement par des glissements partiels et des déformations élastiques dans les contacts.

Le moment résistant provoqué par la charge est fonction de celle-ci. de la construction du roulement à billes avec charge radiale prépondérante. le moment résistant du à la charge peut être tiré de[28] :

$$M_1 = \mathcal{F}_1 \times F \times \left(\frac{F}{C_0} \right)^c \times d_m \text{ (II. 51)}$$

F:Charge sur le roulement en daN

C_0 :Charge de base statique du roulement en daN

\mathcal{F}_1 :Facteur déplacement de la construction du roulement

$\mathcal{F}_1 = 0.0013$ et $c = 0.33$ Pour les roulements à billes à contact oblique $\alpha=40^\circ$

d_m : Diamètre moyen du jeu d'éléments roulants en mm

$$M_1 = 0.0013 \times 0.57 \times \left(\frac{2.57}{380} \right)^{0.33} \times 22 = 0.003 \text{ mm} \cdot \text{daN}$$

Le couple total :

$$M = M_0 + M_1 = 0.07 + 0.003 = 0.073 \text{ mm} \cdot \text{daN}$$

Donc : $W_F = 0.001 \times M \times N_1$

$$= 0.001 \times 0.073 \times 770.23 = 0.0057 \text{ Watt}$$

$$57.10^{-3} \text{ Watt}$$

II.8 Emmanchement mandrin support – corps ($\varnothing 20\text{H7p6}$)

Dans un assemblage avec serrage. La déformation élastique des surfaces conjuguées produit à la surface de contact une pression P dite de frettage. D'après la théorie de Lamé [29], pour des emmanchements cylindriques. La pression maximale de frottement est donnée par :

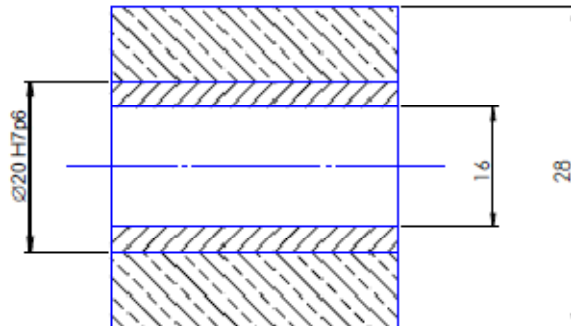


Figure II.16 Assemblage mandrin support – manchon guide

$$P_{\max} = \frac{S_{\max}}{d \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right)} \quad (\text{II. 52})$$

S_{\max} : Serrage maximal ($S_{\max} = es - EI$).

es : Ecart supérieur de l'arbre (mandrin support).

EI : Ecart inférieur du l'alésage (corps).

d : Diamètre nominal d'emmanchement.

E_1, E_2 : Modules d'élasticité longitudinaux de l'arbre et de l'alésage.

C_1, C_2 : Coefficient dont les valeurs sont définies par les relations de Lamé comme suit (fig.II.15) ;

$$C_1 = \frac{d^2 + d_1^2}{d^2 - d_1^2} - \nu_1 \quad (\text{II. 53})$$

$$C_2 = \frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \nu_2 \quad (\text{II. 54})$$

$$\varnothing 20 \text{ H7} \equiv \varnothing 136_0^{+21} . \varnothing 20 \text{ p6} \equiv \varnothing 136_{+22}^{+35}$$

d_1 : Diamètre intérieur de l'arbre ($d_1 = 0$) ;

D : Diamètre extérieur de l'alésage ($D = 28 \text{ mm}$) ;

ν_1, ν_2 : Coefficient de poisson de l'arbre et de l'alésage respectivement.

Les assemblages serrés font naître dans l'arbre deux contraintes tangentielle et l'autre radiale tel que leur résultante maximale $\sigma_{rés}^{max}$ est donnée par Mohr. Pour un arbre plein. Selon la suivante expression :

$$\sigma_{rés}^{max} = 2 \times P_{max} \quad (II.55)$$

➤ Pour l'ajustement ($\varnothing 20$ H7p6)

$$\varnothing 20 \text{ H7} \equiv \varnothing 136_0^{+21} . \varnothing 20 \text{ p6} \equiv \varnothing 136_{+22}^{+35}$$

$$S_{max} = es - EI = 0.035 \text{ mm}$$

Pour l'arbre et le manchon ; $\nu_1 = 0.34$ et $\nu_2 = 0.3$

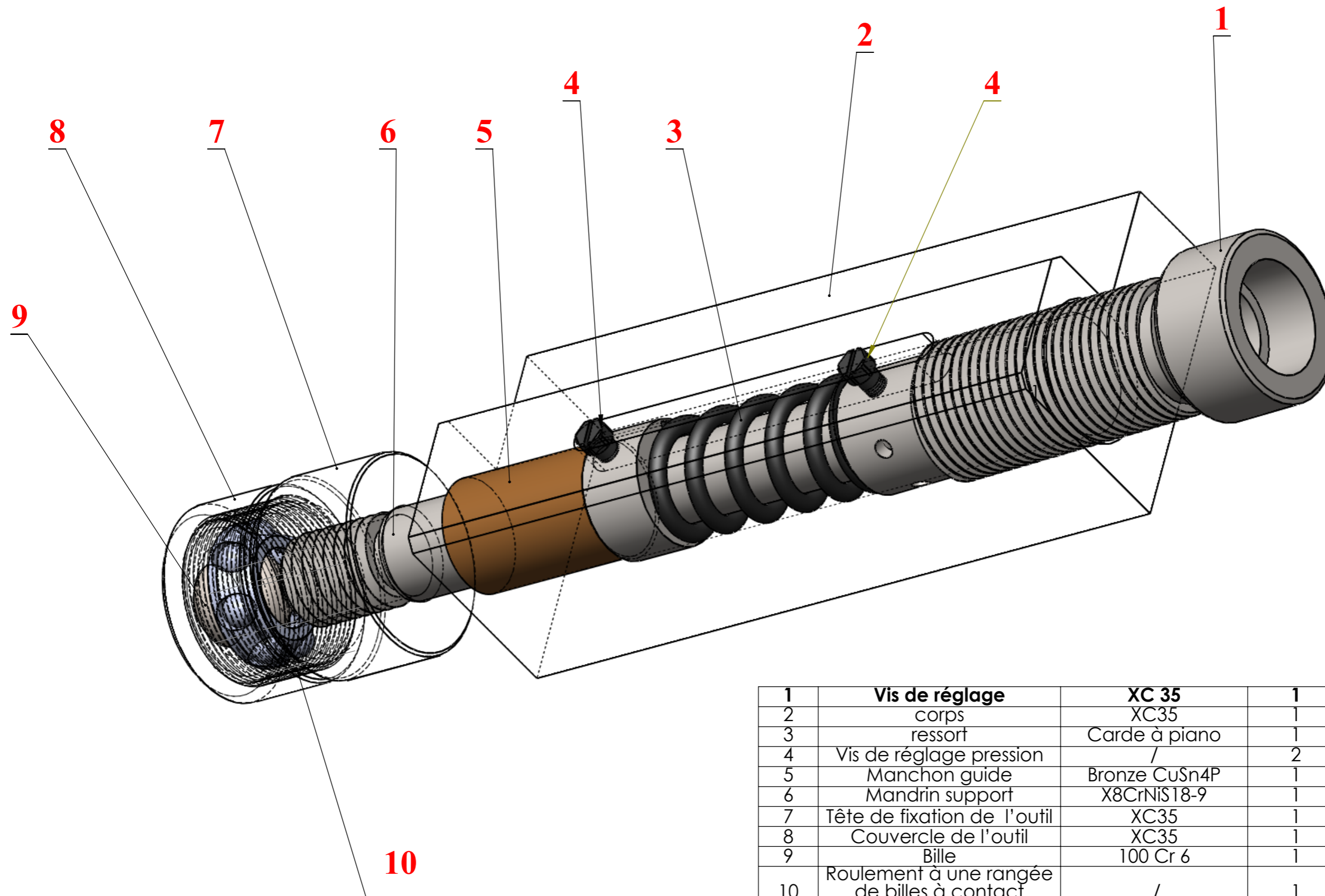
$$E_1 = 102 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$$

$$E_2 = 210 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = 0.66 \\ C_2 = 3.38 \\ P_{max} = 0.077 \text{ MPa} \\ \sigma_{rés}^{max} = 0.15 \text{ MPa} \end{array} \right.$$

II.9 Conclusion

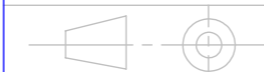
Dans ce chapitre nous avons calculé et vérifié que les résistances de matériaux dans les structures de l'outil résiste ont différentes sollicitations à laquelle est soumise les pièces. par la suite nous avons modélisés en chargement les différentes formes de pièces de l'outil. Et on a présenté la conception de l'outil. Avec les différentes pièces qui le constituent ainsi que son assemblage à l'aide d'un logiciel CAO « SolidWorks » et le dimensionnement au niveau des pièces fabriquées qui sont basés sur la logique et la possibilité de matérialisation d'opérations et du temps de fabrication. Sans considération de contrainte (qualité, ajustement, état de surface) dans cette première partie.



1	Vis de réglage	XC 35	1	
2	corps	XC35	1	
3	ressort	Carde à piano	1	
4	Vis de réglage pression	/	2	
5	Manchon guide	Bronze CuSn4P	1	
6	Mandrin support	X8CrNiS18-9	1	
7	Tête de fixation de l'outil	XC35	1	
8	Couvercle de l'outil	XC35	1	
9	Bille	100 Cr 6	1	
10	Roulement à une rangée de billes à contact oblique	/	1	
N°	Désignations	matières	Quantités	Observations

Matiere :
XC38/
X8CrNiS18-9

Echelle : 1:1



Faculté des Sciences de l'Ingénieur M'hamed Bougara ,Boumerdes

OUTIL DE GALETAGE A BILLE

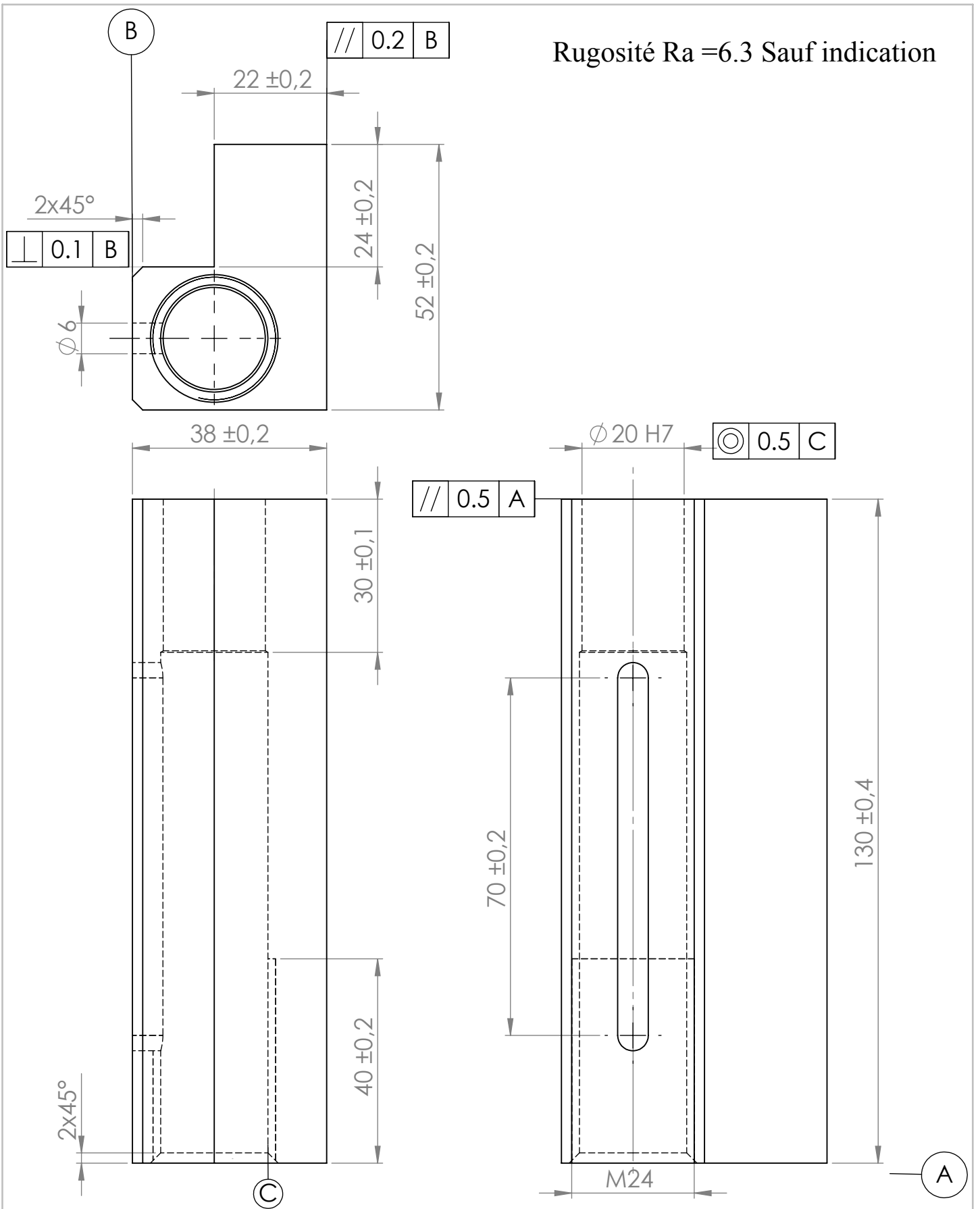
Dessiné par :

MENDIL /
KHARBOUCHE

Poids : 1916 g

Dessin d'ensemble

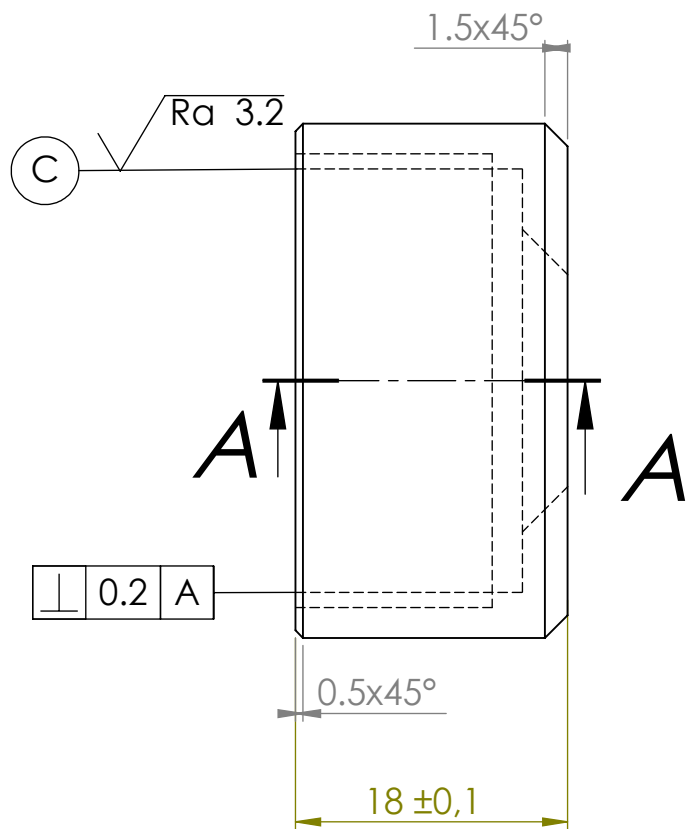
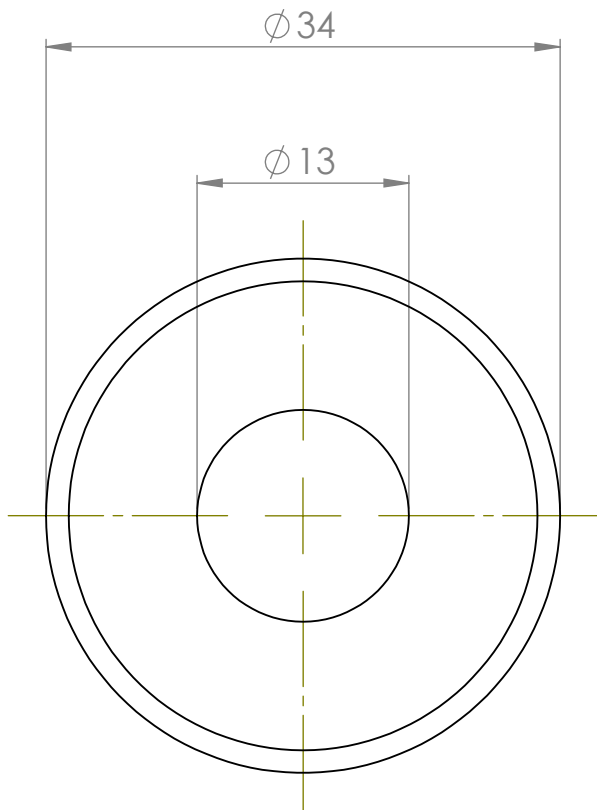
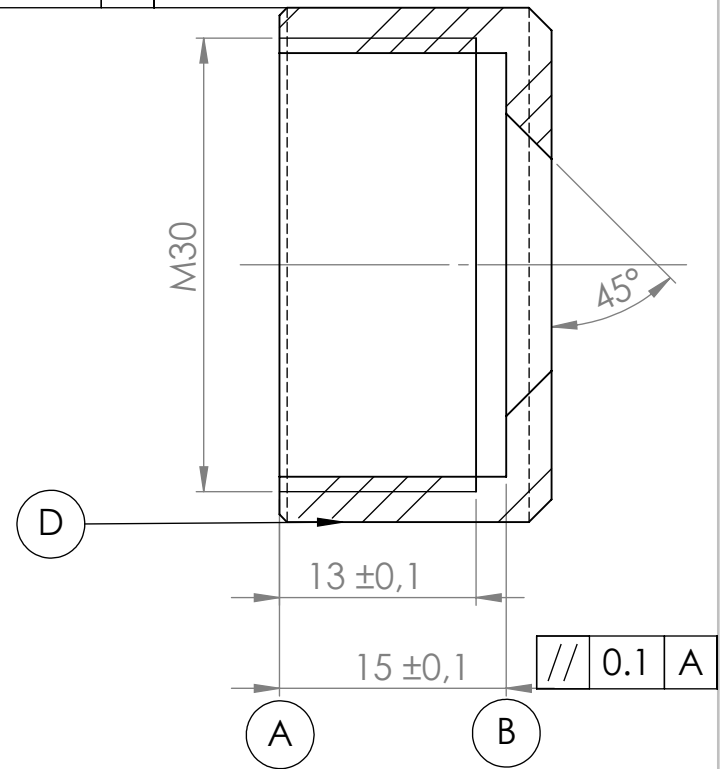
Le :10/06/2017



Matiere : XC38	Faculté des Sciences de l'Ingénieur M'hamed Bougara ,Boumerdes		
Echelle : 1:1	CORPS		Dessiné par : MENDIL et KHERBOUCHE
	Poids : 1246 g	Dessin N° : 03	Le :10/06/2017

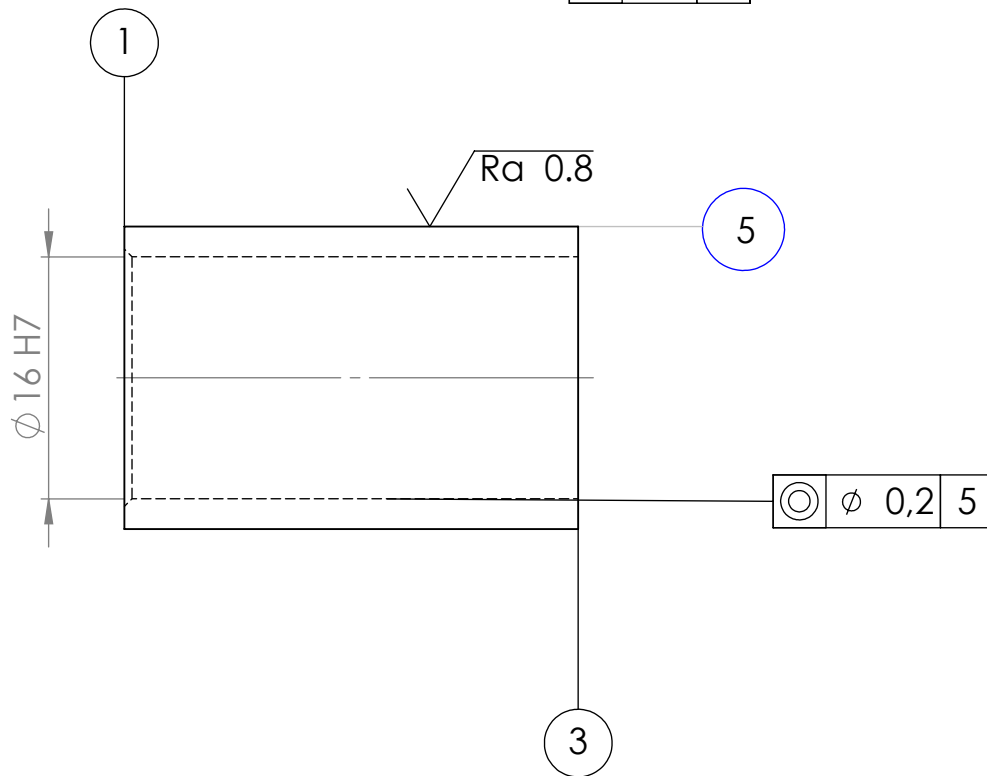
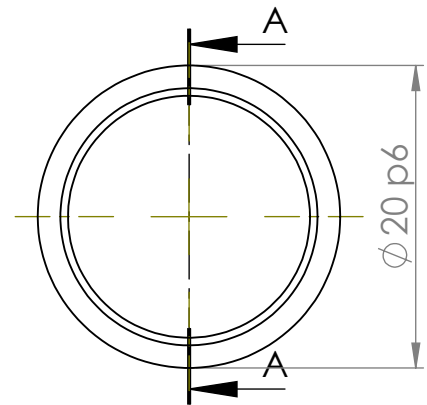
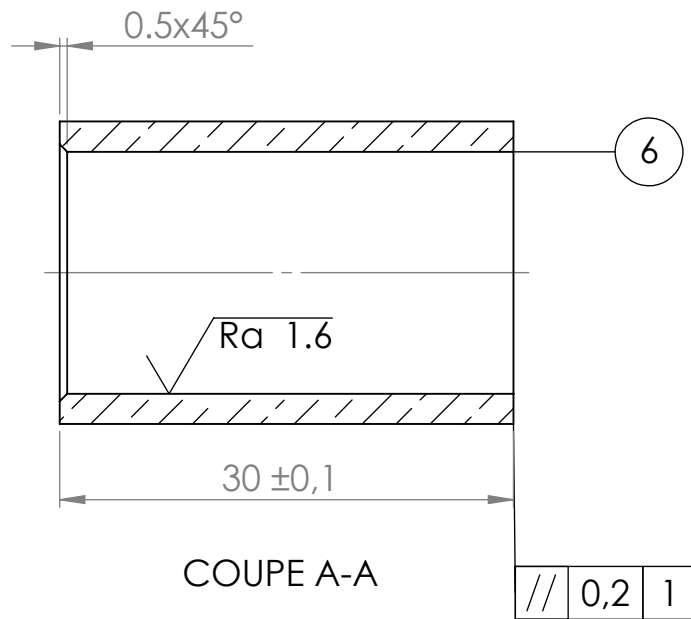
COUPE A-A
ECHELLE 2 : 1

⊙ ϕ 0.1 C



Rugosité Ra =6.3 Sauf indication

Matiere : XC38	Faculté des Sciences de l'Ingénieur M'hamed Bougara ,Boumerdes		
	COUVERCLE		Dessiné par : MENDIL et KHERBOUCHE
Echelle : 1:1	Poids : 50 g	Dessin N° : 04	Le :10/06/2017



Rugosité Ra = 6.3 Sauf indication

Matiere :
CuSn4P

Faculté des Sciences de l'Ingénieur M'hamed Bougara ,Boumerdes

Echelle : 1:1

MANCHON GUIDE

Dessiné par :

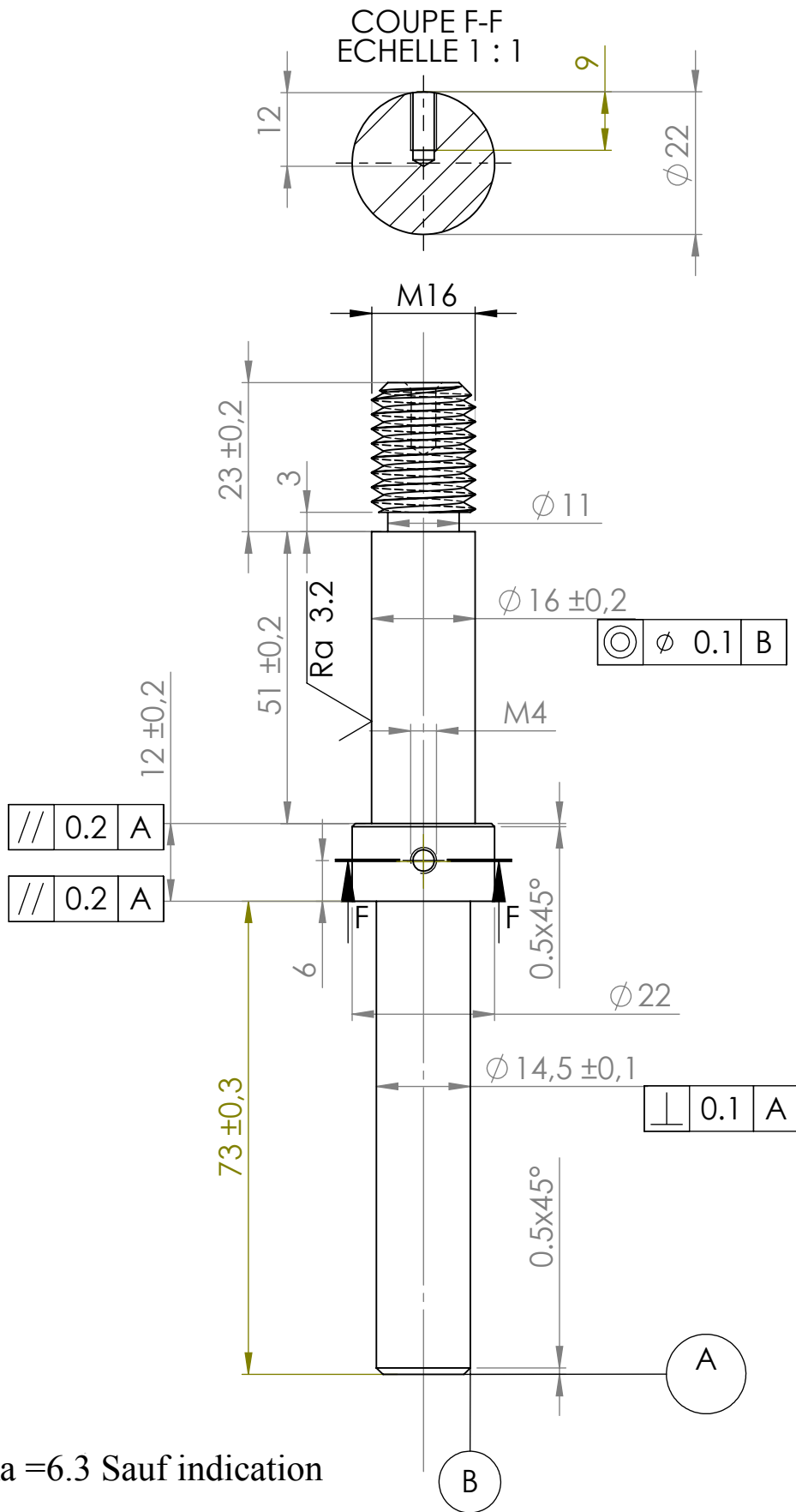
MENDIL et
KHERBOUCHE



Poids : 30 g

Dessin N° : 01

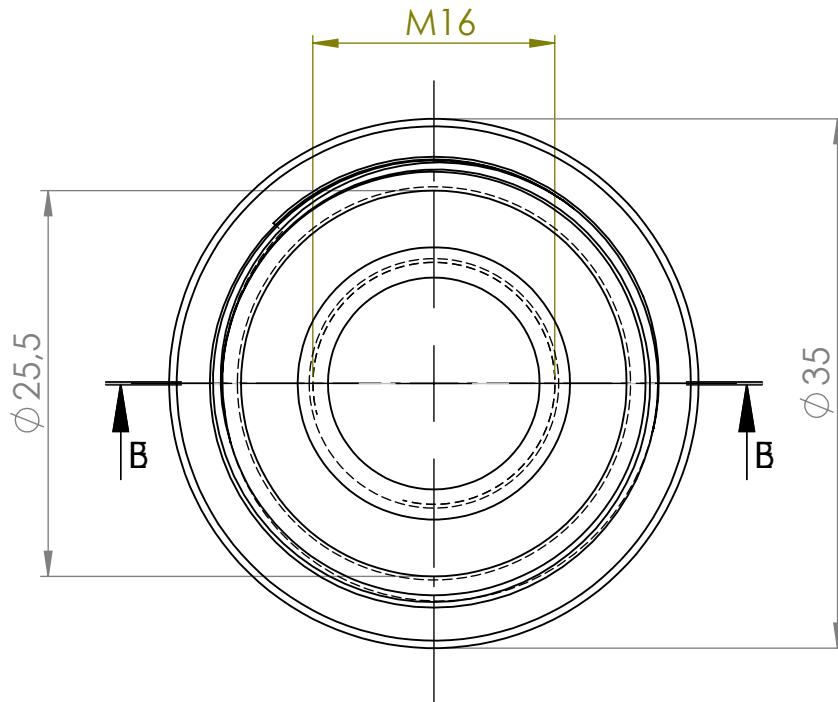
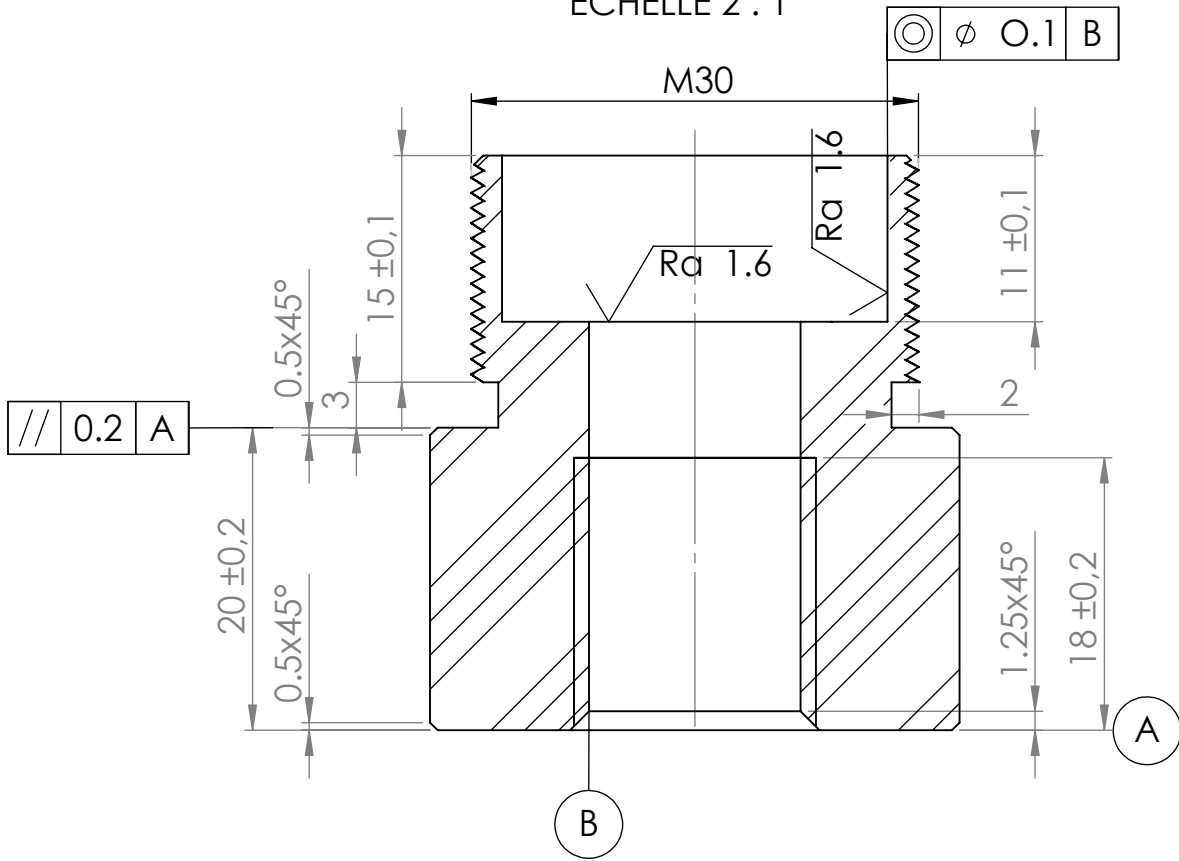
Le : 10/06/2017



Rugosité Ra = 6.3 Sauf indication

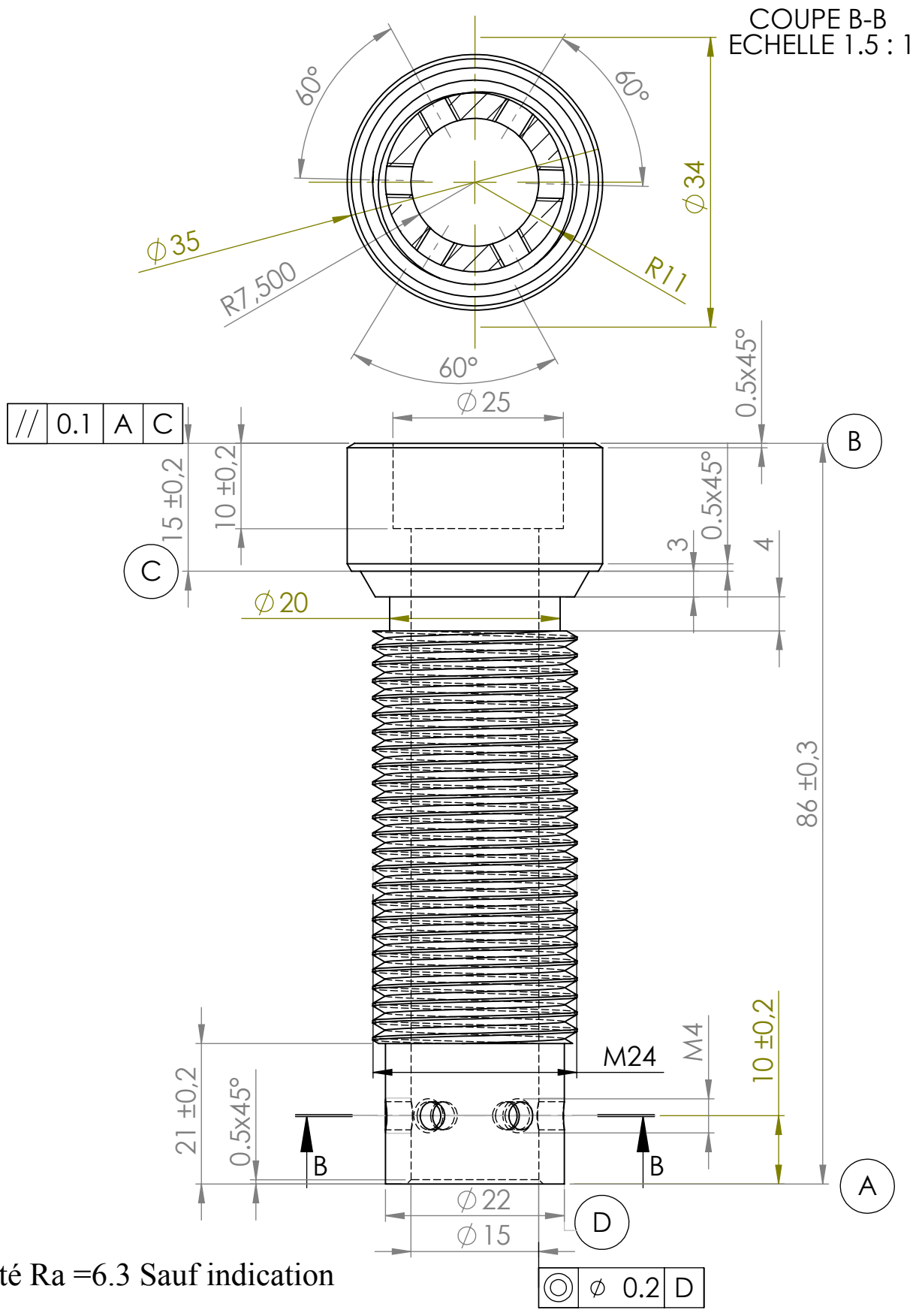
Matiere : X8CrNi18-9	Faculté des Sciences de l'Ingénieur M'hamed Bougara ,Boumerdes		
Echelle : 1:1	MANDRIN SUPPORT		Dessiné par : MENDIL / KHARBOUCHE
	Poids : 228 g	Dessin N° : 02	Le : 10/06/2017


COUPE E-E
ECHELLE 2 : 1



Rugosité Ra =6.3 Sauf indication

Matiere : XC35	Faculté des Sciences de l'Ingénieur M'hamed Bougara ,Boumerdes		
	LA TETE		Dessiné par : MENDIL / KHERBOUCHE
Echelle : 1:1			Poids : 162 g



Matiere : XC38	Faculté des Sciences de l'Ingénieur M'hamed Bougara ,Boumerdes		
Echelle : 1:1	VIS DE REGLAGE		Dessiné par : MENDIL et KHARBOUCHE
	Poids : 170 g	Dessin N° : 06	Le : 10/06/2017

CHAPITRE III :

Réalisation de l'outil de galetage

III.1 Introduction

Après l'étude complète de l'instrument à réaliser nous présentons dans ce chapitre une méthode développée et étude des analyses de fabrication qui nécessite à nous de préparer du bureau des méthodes, une recherche et analyse très approfondie et détaillée et traitement des gammes d'usinage du dessin des pièces ;

Cette méthode qui nous permettons d'établir l'ordre chronologique des opérations élémentaire groupée en phase et aussi d'avoir différentes variantes.

III.2 Définition d'un travail unitaire

Quelle que soient les données économiques de production, il faut toujours établir l'ordre chronologique des surfaces réalisées afin de constituer les phases d'usinage

- Le travail unitaire est réservé à quelque pièce seulement : pièces de réparation, présérie d'un ensemble outillages et appareillages spéciaux etc.
- Ces travaux sont réalisés sur machines dites universelles avec l'outillage classique afin d'éviter le changement de poste et le montage et démontage des pièces.
- Un grand nombre d'opérations sont réalisées sans démontage de la pièce, mais avec changement des outils.
- En travail unitaire, on ne prévoit pas de montage et d'appareillage spéciaux.
- Dans certains cas le traçage facilite l'usinage (axes, contours, pontage).
- La préparation du travail doit être simple généralement elle est fonction de la qualification des ouvriers.
- Il n'est pas nécessaire de définir les opérations élémentaires de chaque surface.
- Établissons directement le tableau des contraintes d'antériorité en suite le tableau des niveaux l'ordre chronologique de la réalisation des surfaces, et enfin établir une gamme pour l'ouvrier (cette gamme n'est pas nécessaire, mais le but est d'appliquer la méthode de traitement des gammes).

Sur la feuille de contrat des phases les cotes obtenues ne sont pas des cotes machines, cotes appareillages car l'ouvrier travaille au tracé ou par mesures successives.

III.3 Étude de dessin de définition

L'analyse du dessin de définition et une des séquences les plus importantes que l'on ait traité. Il faut faire appel à toutes ses connaissances et tout son savoir-faire pour étudier la faisabilité ou non d'une pièce. Dans tous les cas il est impératif de s'assurer que l'on sera capable de respecter toutes les spécifications du dessin de définition. De plus, après la fabrication on doit être en mesure de faire le contrôle métrologique de la pièce.

L'analyse que l'on va effectuer portera sur les éléments suivants :

- L'inventaire des différentes surfaces à usiner.
- L'analyse des cotes des surfaces usinées.
- L'analyse des spécifications d'état de surface.

III.4 L'inventaire des différentes surfaces à usiner

Consiste en numérotation des surfaces usinées s'il existe un dessin de la pièce brute celui-ci pourra nous aider à recenser les surfaces à usiner. Alors que l'analyse des cotes relatives aux surfaces usinées à ces cotes.

Ces tolérances auront une influence importante sur les problèmes de mise en position et du maintien direct sur la mise en position, les conditions de position entre les surfaces auront une influences directe sur la mise en position de la pièce lors de l'usinage tandis que les tolérances de formes auront un influences sur les procédés de fabrication, les problèmes de bridage des pièces, quant aux efforts de coupes ils auront une indices sur la qualité de la surfaces.

III.5 Graphe orient des conditions du BE

L'orientation du graphe des conditions du BE permet de faire l'inventaire des contraintes de dimensions et spécification.

III.6 Détermination des opérations élémentaires

- A. A partir de dessin de définition de la pièce on fait intervenir de toutes les surfaces à usines.
- B. Pour chaque surface ou regroupement de surfaces on définit les opérations élémentaires.
 - L'ébauche (E) : qui permet d'approcher la cote en enlevant le maximum de matière.
 - La demi-finition (F/2) : qui permet d'obtenir la forme et la précision géométrique.
 - La finition (F) : qui permet d'obtenir la cote et l'étude de surface.

Le nombre d'opérations élémentaire nécessaire à l'obtention d'une surface peut être déterminé à partir de trois critères : la qualité dimensionnelle, l'état de surfaces et la rigidité de la pièce.

III.7 Qualité dimensionnelle

Dans le cas générale la détermination de la qualité dimensionnelle des surfaces usinées peut se faire en tranchant le graphe des conditions du bureau étude. Le sommet de ce graphe représentante les surfaces à usinée. A un sommet se rattachent arcs : la qualité

Dimensionnelle retenu pour la surfaces correspondante set alors définir par la tolérance La plus faible, c'est-à-dire qui conduit à l'indice de qualité le plus faible. Si la surface est elle-même définie par une cote la qualité dimensionnelle de cette cote doit être prise en compte.

III.8 Etat de surface

La symbolisation des spécifications des surface est normalise, le critère le plus souvent utilisé est Ra exprime en micromètre.

III.9 Rigidité de la pièce

Au court d'une opération d'usinage la pièce peut se déformer sous l'action des efforts de coup ou par la libération des contraintes.

Si le risque de déformation existe, il y a le lieu de réaliser l'usinage en plusieurs passes en évitant de prendre une section de copeau trop importante.

III.10 Contrat de phase

Le contrat de phase est le document de référence de l'opérateur. Il décrit l'ensemble des opérations, éventuellement groupées en sous-phases, réalisées sur un même poste de travail.

Réalisé à partir de l'avant-projet de fabrication, il permet à l'opérateur de :

- déterminer la cotation de fabrication,
- de mettre en place les montages d'usinage,
- de réaliser les réglages de la machine,
- de préparer le poste de contrôle.

Il devient définitif lorsque les responsables de production ont validé le processus de fabrication et que celle-ci peut être qualifiée de fabrication stabilisée.

Le numéro de la phase : il permet de repérer la phase dans l'ordre chronologique de la nomenclature des phases.

A. La désignation de la phase.

B. Les références de la pièce :

- ensemble,
- pièce,
- matière,
- nombre.

La machine-outil utilisée : dans une unité de production importante, la machine est désignée de façon précise (type, numéro, ...) en fonction de la planification de la gestion de production (ordonnancement).

C. Le croquis de phase :

- dessin de la pièce à usiner,
- symbolisation technologique de la mise en position,
- cotation de fabrication,

- repérage des surfaces,
- surface(s) usinée(s) repassée(s) en trait fort ou autre couleur,
- dessin de l'outil de coupe,
- Mc et Mf.

D. Les axes machines.

E. Les opérations d'usinage.

F. Les éléments de coupe.

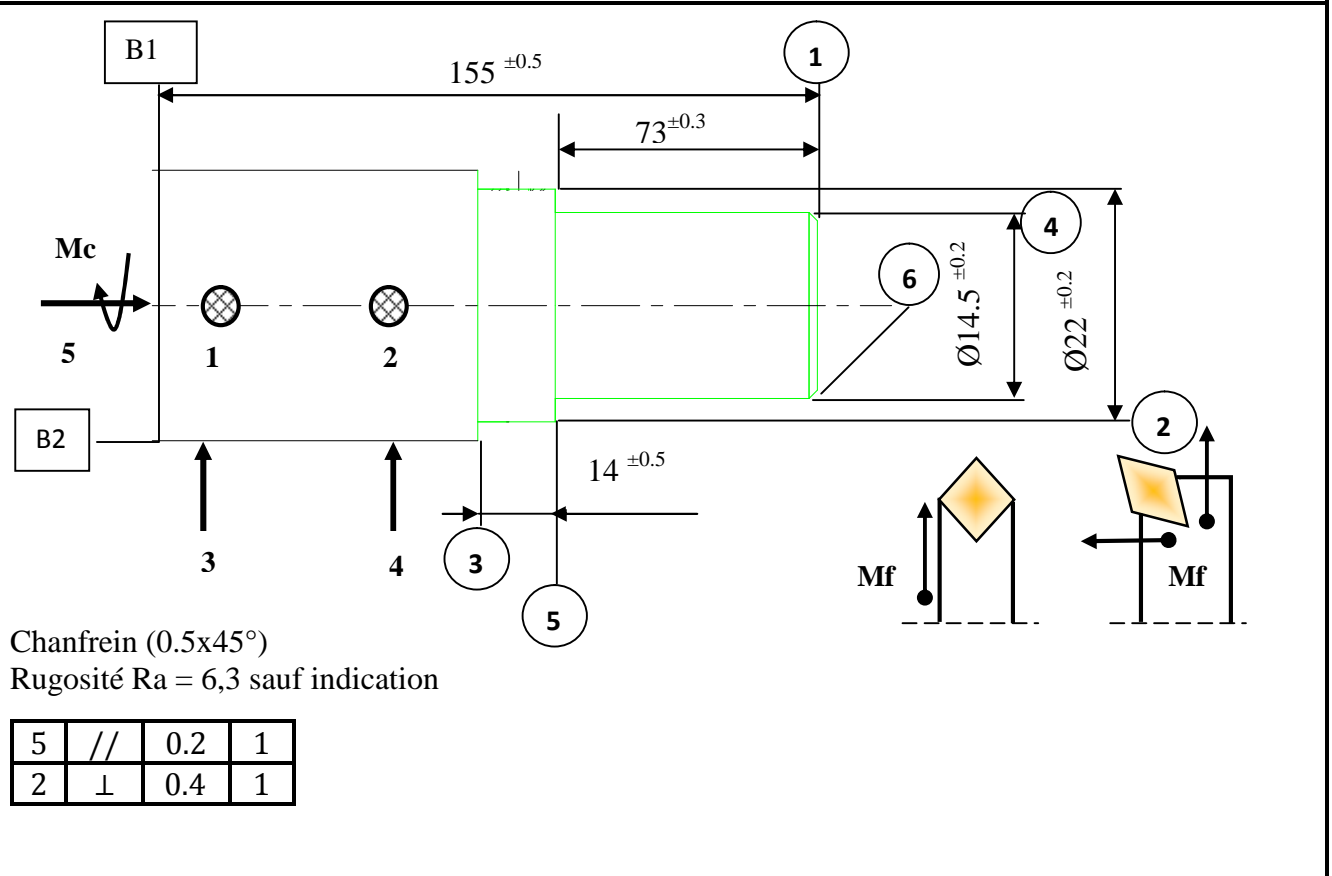
G. L'outillage de fabrication et de vérification.

NB : Chaque contrat de phase contient 100 (contrôle de brut) qui contrôlent les cotes et spécification suivant le plan du brut sur les ateliers d'analyse de laboratoires de métrologie et métallurgie).

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES
	Pièce : MANDRIN SUPPORT	
Phase N° 200	Matière : X8CrNiS18-9	
	Nombre : 01	

Désignation des opérations : **TOURNAGE**

Machine - outil : **TOUR PARALLELE - PORTE PIECE – MANDRIN TROIS MORS DOUX**



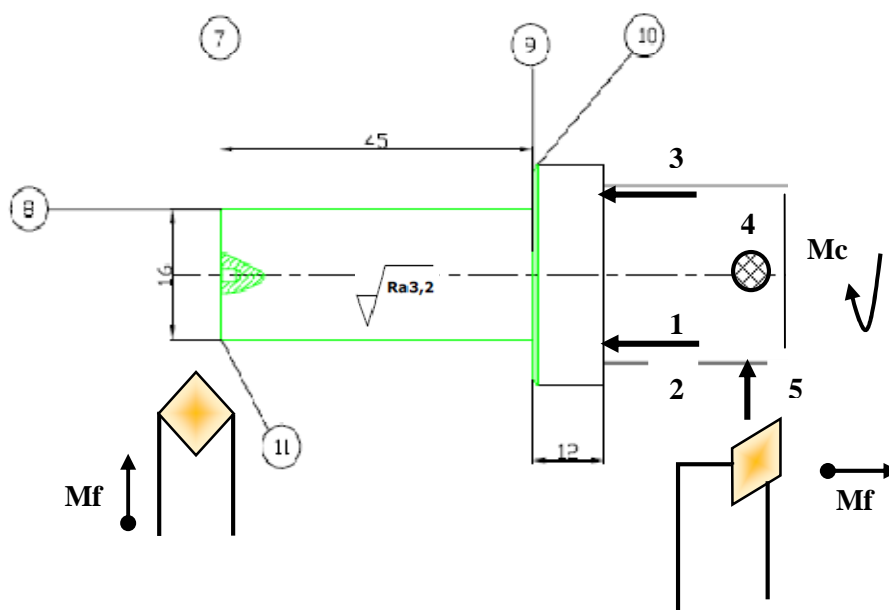
Mise en positions et désignation des opérations	Éléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : ▪ Centrage long sur B2 ▪ Un seul appui sur B1						
Opérations : ▪ 201 : Dresser(1F)	120	1045	0.125	/	130	Outil en carbure
▪ 202 : Charioter et Dresser(2F) et (3F)	120	1045	0.25	/	260	Outil en carbure
▪ 203 : Charioter et Dresser(4F) et (5F)	120	1500	0.25	/	375	Outil en carbure
▪ 204 : chanfreiner (6F)	120	1500	/	/	/	Outil en carbure
Moyen de contrôle	Pied à coulissé, Rugosémetre,					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES
	Pièce : MANDRIN SUPPORT	
Phase N° 300	Matière : X8CrNiS18-9	
	Nombre : 01	

Désignation des opérations : **TOURNAGE**

Machine - outil : **TOUR PARALLELE - PORTE PIECE – MANDRIN TROIS MORS DOUX**

9	//	0.2	1
8	⊙	Ø0.2	2



Les Chanfreins (0.5x45°) ;Rugosité Ra = 6,3 sauf indication, tolérance ±0.2

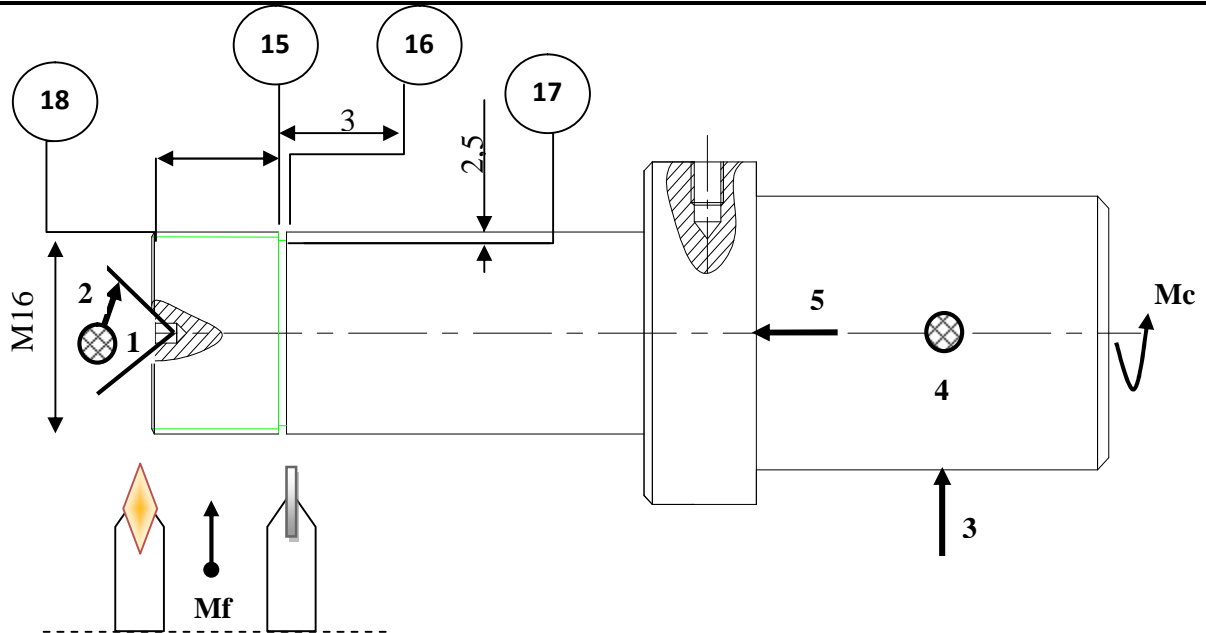
Mise en positions et désignation des opérations	Éléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Trois appuis plans sur 5 ▪ Deux appuis linéaires sur 2 						
▪ 301 : Dresser 7F	120	1045	0.125	/	130	Outil en carbure
▪ 302 : Charioter et Dresser (8,9 E)	120	1045	0.25	/	260	
▪ 303 : Charioter et Dresser (8,9 F)	120	1500	0.25	/	1045	
▪ 304 : Centrage 12F	22	520	/	/	/	foret en A.R(Ø4)
▪ 305 : Chanfreiner (10,11F)	120	1500	/	/	/	Outil en carbure
Moyen de contrôle	Pied à coulissé, Rugosémetre,					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES				
	Pièce : MANDRIN SUPPORT					
Phase N° 400	Matière : X8CrNiS18-9					
	Nombre : 01					
Désignation des opérations : PERCAGE						
Machine - outil : PERCEUSE - PORTE PIECE – ETAU						
Toutes les surfaces Ra = 6,3						
Mise en positions et désignation des opérations	Éléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : ▪ Centrage long sur B2 ▪ Un seul appui sur 1						
Opérations : ▪ 401 : perçage (13F)	23	1800	/	/	/	foret en A.R (Ø = 4 mm)
▪ 402 : Tarauder (14F)	/	/	/	/	/	Taraud (M4)
Moyen de contrôle	Pied à coulissé, Joug de profondeur, Vis M4					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES
	Pièce : MANDRIN SUPPORT	
Phase N° 500	Matière : X8CrNiS18-9	
	Nombre : 01	

Désignation des opérations : **TOURNAGE**

Machine - outil : **TOUR PARALLELE - PORTE PIECE – MANDRIN TROIS MORS DOUX**



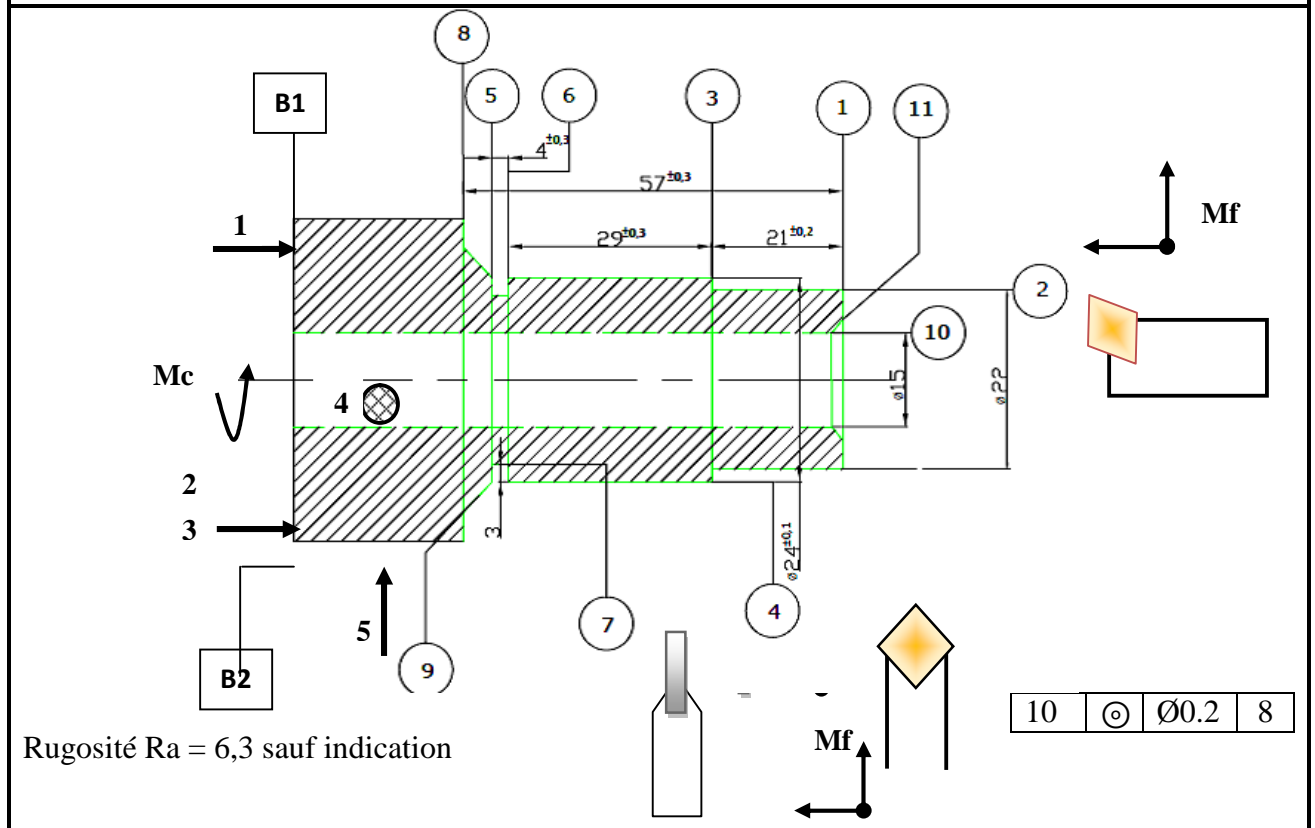
Rugosité : Ra=6,3

Mise en positions et désignation des opérations	Eléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : ▪ Centrage court sur 2 ▪ Pointe mobile sur 12 ▪ Un seul appui sur 5						
Opérations : ▪ 501 : gorge (15F, 16F, 17F)	26	520	0.04	/	20	Outil en acier rapide
▪ 502 : Filetage (18F)	32	745	0.866	/	645	Outil en carbure
Moyen de contrôle	Rugosémetre, Pied à coulissé, jouge de profondeur, écrou M16					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES
	Pièce : VIS DE REGLAGE	
Phase N° 200	Matière : XC38	
	Nombre : 01	

Désignation des opérations : **TOURNAGE**

Machine - outil : **TOUR PARALLELE - PORTE PIECE – MANDRIN TROIS MORS DOUX**



Rugosité Ra = 6,3 sauf indication

Mise en positions et désignation des opérations	Eléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : ▪ Trois appuis plans sur B1 ▪ Deux appuis linéaires sur B2						
Opérations : ▪ 201 : Dresser (1F)	160	1045	0.125	/	130	Outil en carbure
▪ 202 : Charioter et Dresser (4Fet 2F,3F)	160	1045	0.25	/	261	Outil en carbure
▪ 203 : Chanfreiner et Dresser (9Fet 8F)	130	1500	0.375	/	562	Outil en carbure
▪ 204 : Corge(5F, 6F, 7F)	18	376	0.05	/	19	Outil en AR
▪ 205 : Perçage (10E)	23	376	/	/	/	Foret en AR(Ø14)
▪ 206 : Alésage (10F)	100	1045	0.07	/	73	Alésoir en carbure
▪ 207 : Chanfreiner (11F)	160	1045	/	/	261	Outil en carbure
Moyen de contrôle	Rugosétre, Pied à coulissé, jauge de profondeur					

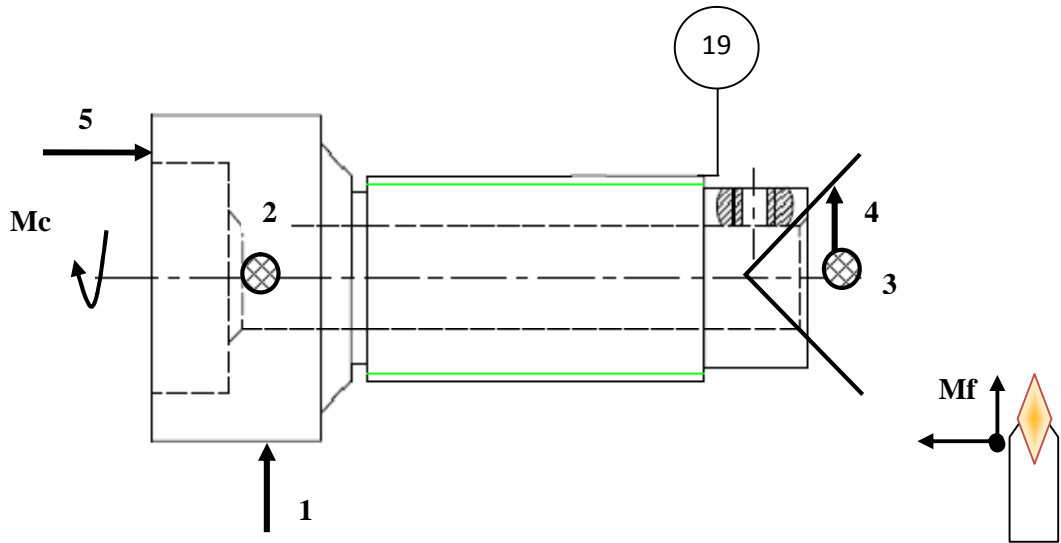
CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES							
	Pièce : VIS DE REGLAGE								
Phase N° 300	Matière : XC38 Nombre : 01								
Désignation des opérations : TOURNAGE									
Machine - outil : TOUR PARALLELE - PORTE PIECE – MANDRIN TROIS MORS DOUX									
<table border="1" style="float: right;"> <tr> <td>12</td> <td>//</td> <td>0.1</td> <td>8</td> </tr> </table>						12	//	0.1	8
12	//	0.1	8						
Rugosité Ra 6,4 sauf indication									
Mise en positions et désignation des opérations	Éléments de coupe					Outillage de coupe			
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min				
Mise en position : ▪ Centrage long sur 4 ▪ Un seul appui sur 1									
Opérations : ▪ 301 : Dresser (12F)	160	1045	0.125	/	130	Outil en carbure			
▪ 302 : Charioter (13F)	160	1045	0.25	/	261	Outil en carbure			
▪ 303 : Cambrage (14F et 15F)	80	1045	0.125	/	130	Outil en carbure			
▪ 304 : Chanfreiner (16F)	160	1045	/	/	261	Outil en carbure			
Moyen de contrôle :	Rugosémetre, Pied à coulissé, jouge de profondeur,								

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES				
	Pièce : VIS DE REGLAGE					
	Phase N° 400					
	Matière : XC38					
	Nombre : 01					
Désignation des opérations : PERCAGE						
Machine - outil : PERCEUSE - PORTE PIECE – DIVISEUR						
Rugosité Ra 6,4						
Mise en positions et désignation des opérations	Eléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : ▪ Pointe fixe sur 16 ▪ Pointe mobile sur 11 ▪ Un seul appui sur 12						
Opérations : ▪ 401 : Perçage (17 F)	23	1800	/	/	/	foret en A.R (Ø = 4 mm)
▪ 402 : Filetage (18 F)	/	/	/	/	/	Taraut (M4)
Moyen de contrôle	Pied à coulissé, jouge de profondeur, vis M4 ; Rugosétre					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES
	Pièce : VIS DE REGLAGE	
Phase N° 500	Matière : XC38	
	Nombre : 01	

Désignation des opérations : **TOURNAGE**

Machine - outil : TOUR PARALLELE - PORTE PIECE – MANDRIN TROIS MORS DURS



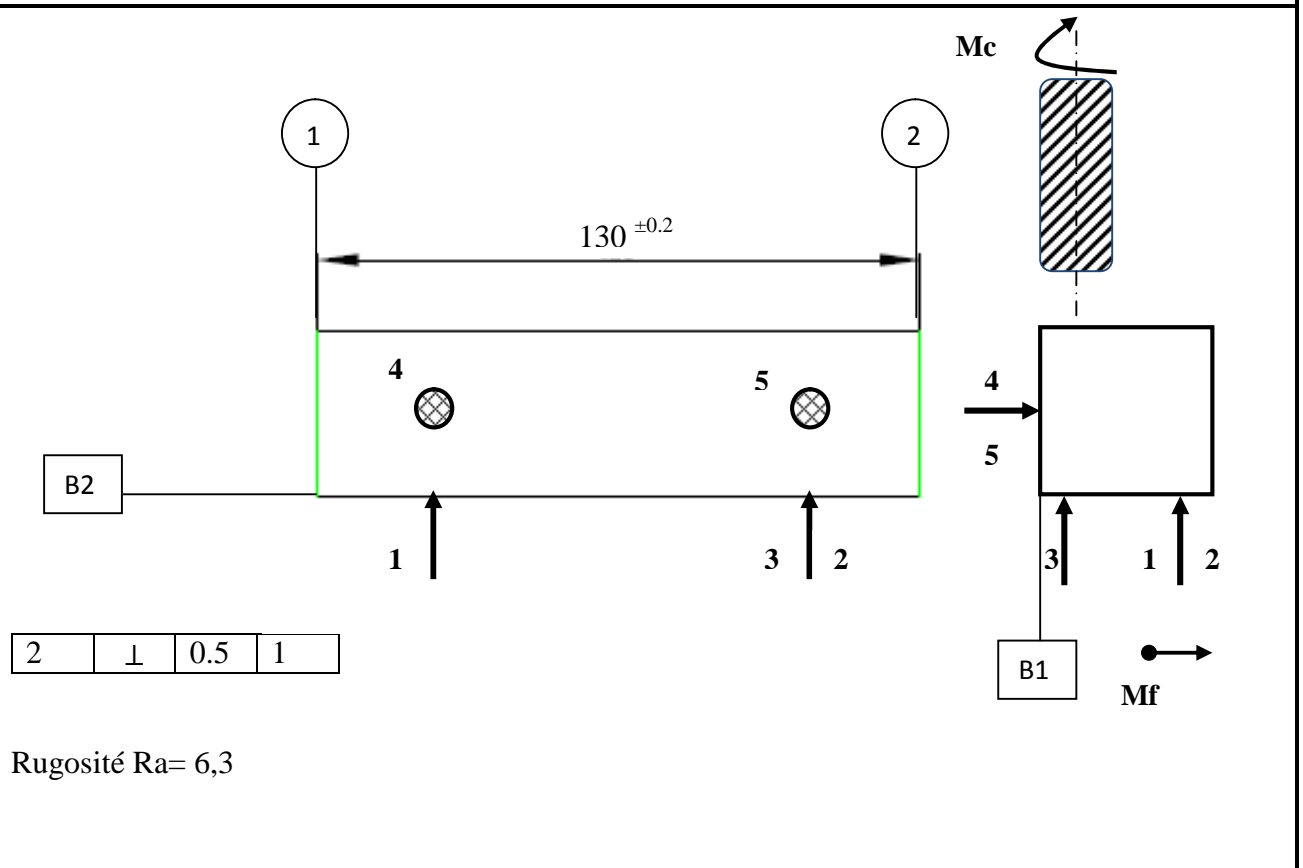
Rugosité Ra 6,4

Mise en positions et désignation des opérations	Eléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : ▪ Centrage court sur 13 ▪ Pointe fixe sur 11 ▪ Un seul appui sur 12						
Opérations : ▪ 501 : Filetage (19F) M24	75	1045	0.866	/	904	Outil en carbure
Moyen de contrôle	jougé de profondeur, écrou M24, Rugosémetre					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES
	Pièce : CORPS	
Phase N° 200	Matière : XC38	
	Nombre : 01	

Désignation des opérations : **FRAISSAGE**

Machine - outil : **FRAISEUSE HORIZONTALE- PORTE PIECE – ETAU**

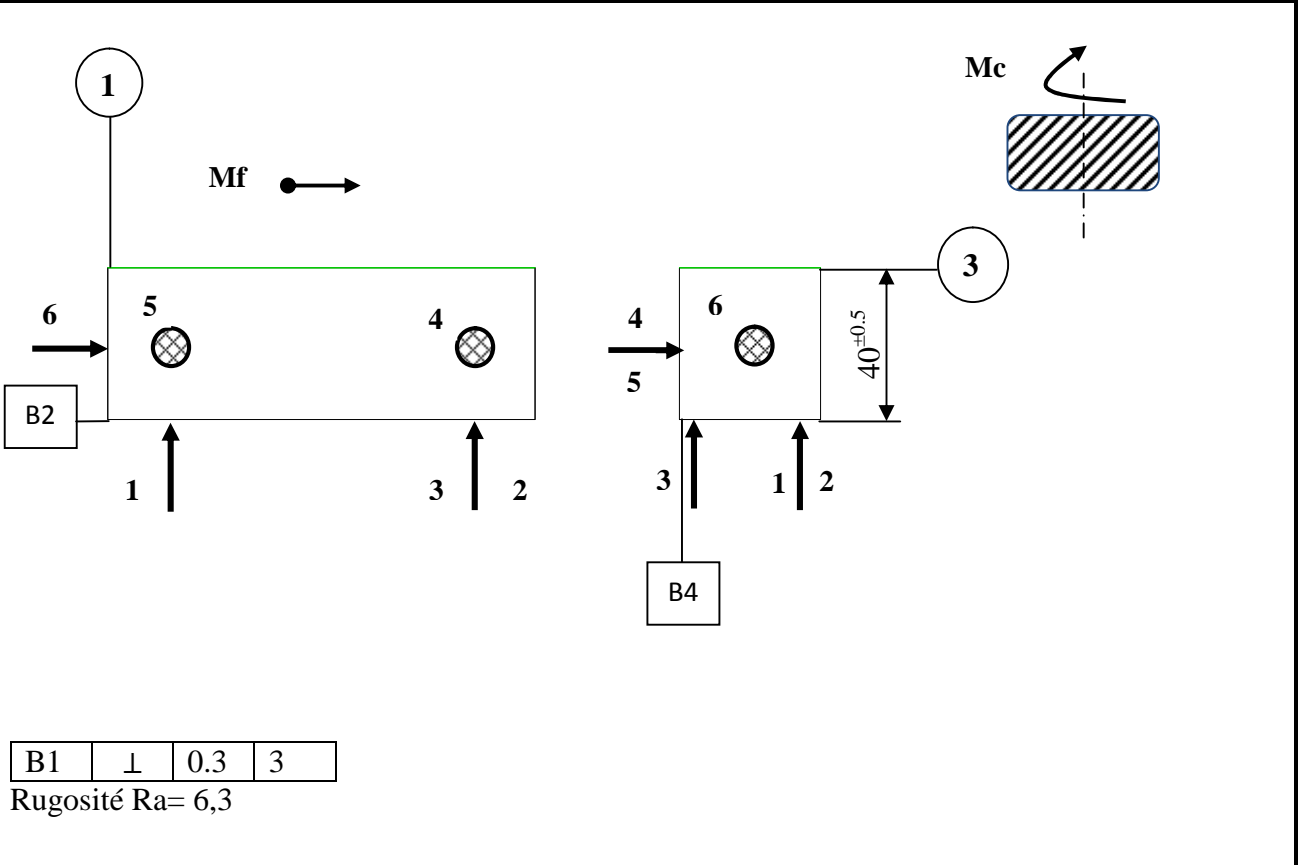


Mise en positions et désignation des opérations	Eléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Trois appuis plans sur B2 ▪ Deux appuis plans sur B1 						
Opérations : <ul style="list-style-type: none"> ▪ 201 : Dressage (1F) ▪ 202 : Dressage (2F) 	26	450	0.1	0.6	270	Fraise deux lèvres
Moyen de contrôle	Rugosémetre, Pied à coulissé					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES
	Pièce : CORPS	
Phase N° 300	Matière : XC38	
	Nombre : 01	

Désignation des opérations : **FRAISSAGE**

Machine - outil : **FRAISEUSE HORIZONTALE - PORTE PIECE – ETAU**



Mise en positions et désignation des opérations	Eléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : ▪ Trois appuis plans sur B2 ▪ Deux appuis plans sur B4 ▪ Un seul appui sur 1						
Opérations : ▪ 301 : Dressage (3F)	26	250	0.12	0.72	240	Fraise deux lèvres
Moyen de contrôle	Rugosémetre, Pied à coulissé					

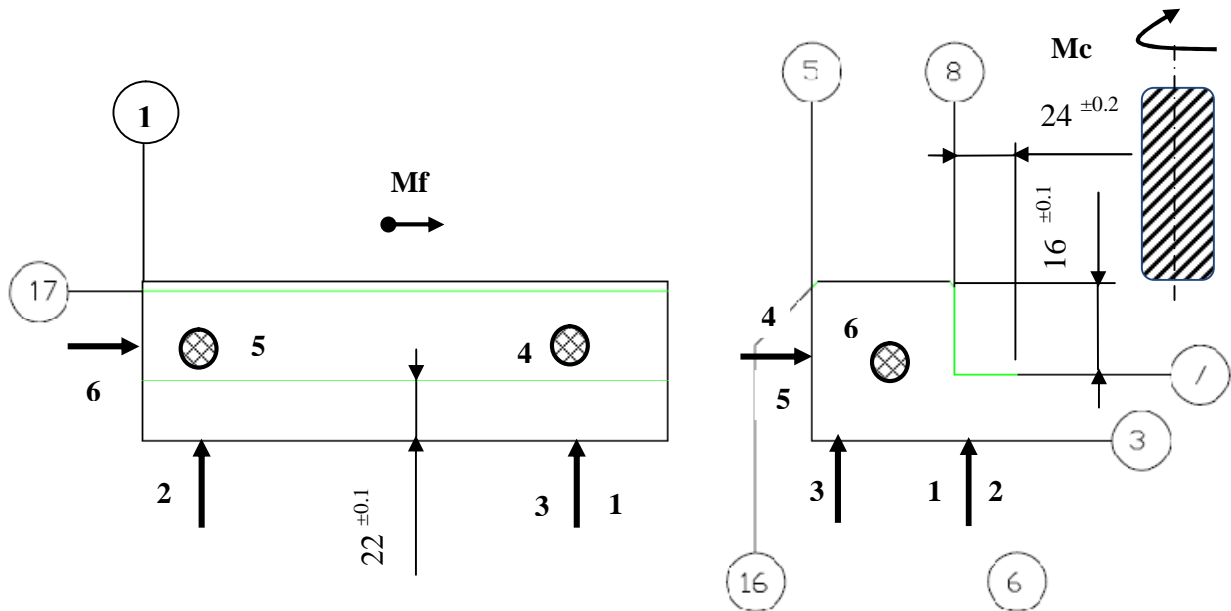
CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE					BUREAU DES METHODES				
	Pièce : CORPS									
	Phase N° 400									
	Matière : XC38									
	Nombre : 01									
Désignation des opérations : FRAISSAGE										
Machine - outil : FRAISEUSE HORIZONTALE - PORTE PIECE – ETAU										
<p>Rugosité Ra=6,3</p> <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td style="width: 20px; text-align: center;">4</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">//</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">0,2</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">3</td> </tr> </table> <div style="margin-left: 100px;"> <p>Mf →</p> </div>							4	//	0,2	3
4	//	0,2	3							
Mise en positions et désignation des opérations	Eléments de coupe					Outillage de coupe				
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min					
Mise en position : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Trois appuis plans sur 3 ▪ Deux appuis plans sur B4 ▪ Un seul appui sur 1 										
Opérations : <ul style="list-style-type: none"> ▪ 401 : Dressage (4F) 	26	250	0.12	0.72	240	Fraise deux lèvres				
Moyen de contrôle	Rugosémetree, Pied à coulissé									

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE					BUREAU DES METHODES
	Pièce : CORPS					
	Phase N° 500					
	Matière : XC38					
	Nombre : 01					
Désignation des opérations : FRAISSAGE						
Machine - outil : FRAISEUSE HORIZONTALE - PORTE PIECE – ETAU						
<p>Rugosité Ra= 6,3</p>						
Mise en positions et désignation des opérations	Eléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Trois appuis plans sur B3 ▪ Deux appuis plans sur 3 ▪ Un seul appui sur 1 						
Opérations : <ul style="list-style-type: none"> ▪ 501 : Dressage (5F) 	26	250	0.12	0.72	240	Fraise deux lèvres
Moyen de contrôle	Rugosémetre, Pied à coulissé					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES
	Pièce : CORPS	
Phase N° 600	Matière : XC38	
	Nombre : 01	

Désignation des opérations : **FRAISSAGE**

Machine - outil : **FRAISEUSE HORIZONTALE - PORTE PIECE – ETAU**



6,8	⊥	0,3	3
-----	---	-----	---

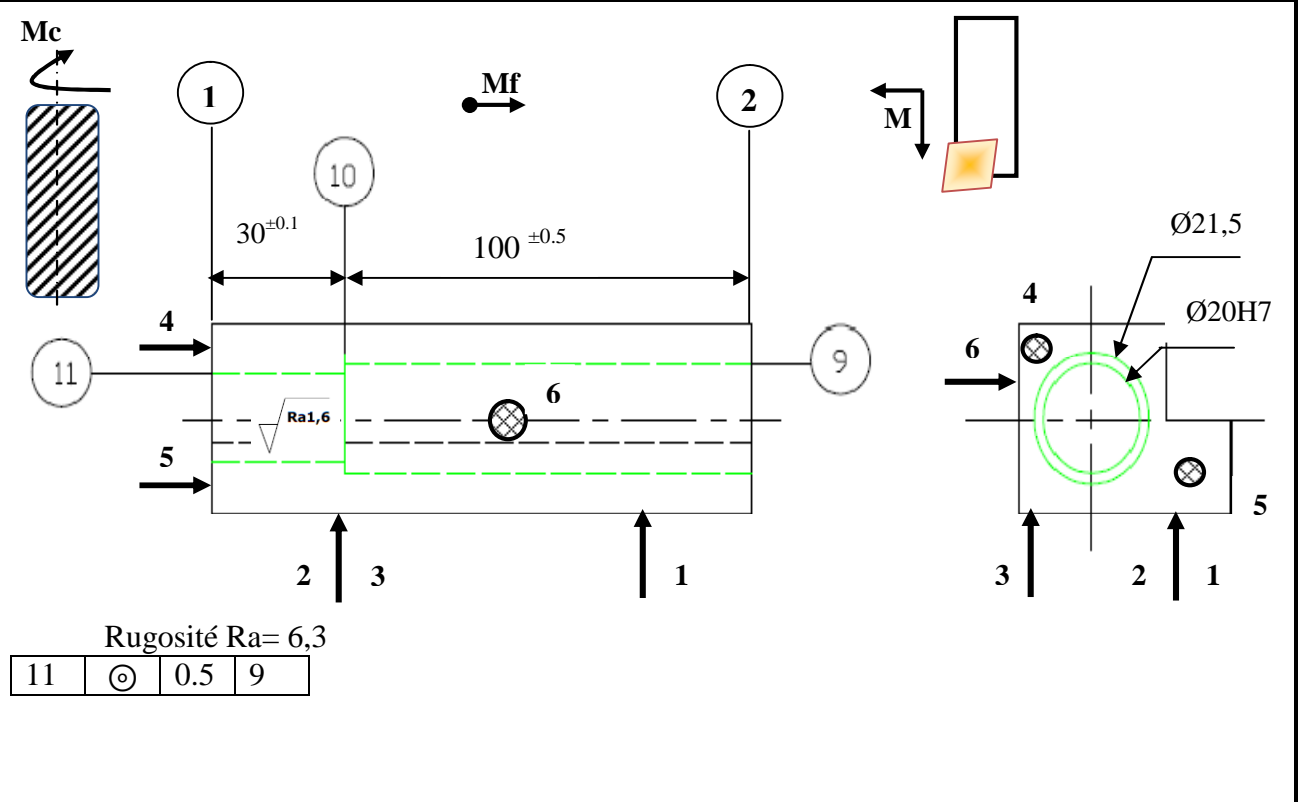
Rugosité Ra= 6,3

Mise en positions et désignation des opérations	Éléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : ▪ Trois appuis plans sur 3 ▪ Deux appuis plans sur 5 ▪ Un seul appui sur 1						
Opérations : ▪ 601 : Dressage (6F, 7F)	26	450	0.1	0.6	270	Fraise deux lèvres
▪ 602 : Dressage (8F)	26	450	0.1	0.6	270	
Moyen de contrôle	Rugosémetre, Pied à coulissé					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES
	Pièce : CORPS	
Phase N° 700	Matière : XC38	
	Nombre : 01	

Désignation des opérations : **FRAISSAGE**

Machine - outil : **FRAISEUSE HORIZONTALE - PORTE PIECE – MANDRIN QUATRE MORSDOUX**



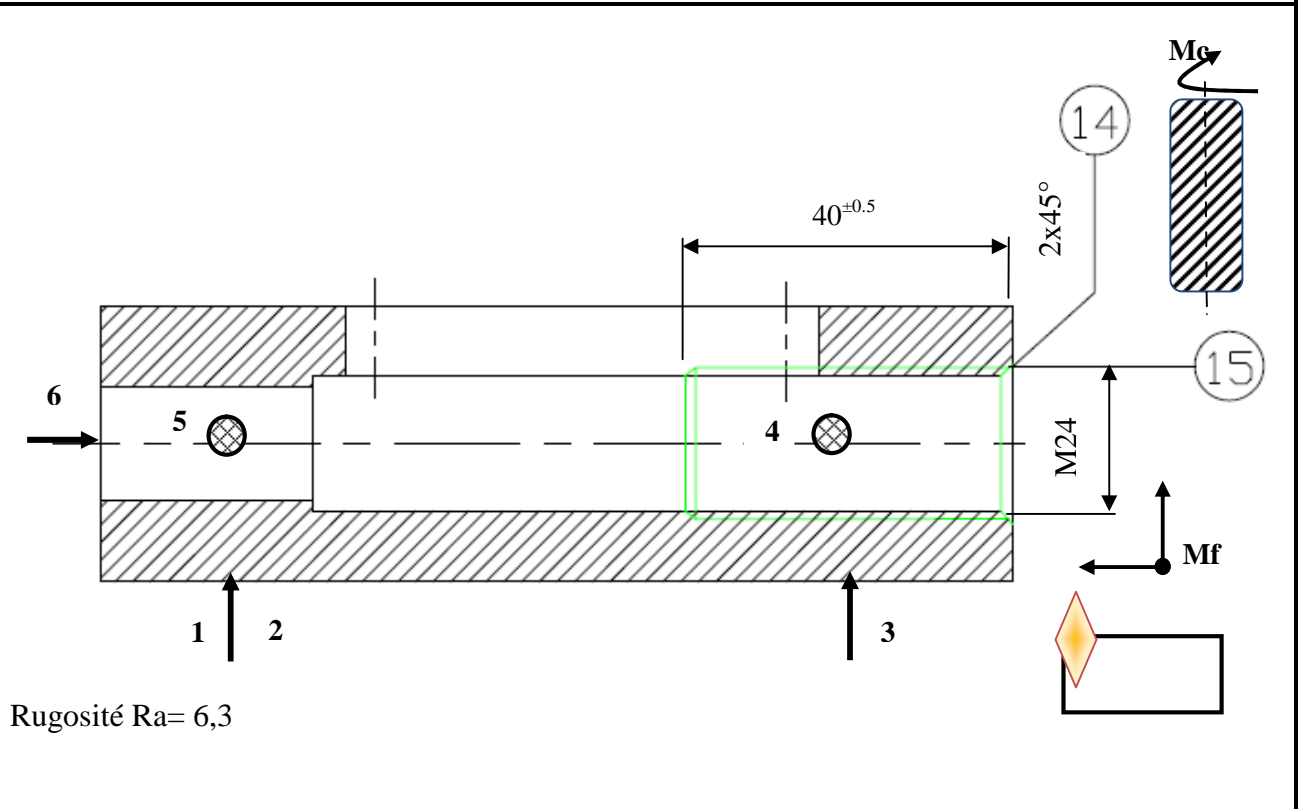
Mise en positions et désignation des opérations	Éléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Trois appuis plans sur 3 ▪ Deux appuis plans sur 1 ▪ Un seul appui sur 5 						
Opérations : <ul style="list-style-type: none"> ▪ 701 : perçage (11E) 	23	350	0.27	1.62	562	Foret en AR Ø19.5
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 702 : perçage (11F/2) 	23	350	0.27	1.62	562	Foret en AR Ø19.9
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 703 : alésage (11F) 	10	160	0.30	1.62	288	Alésoir Ø 20
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 702 : perçage (9F et 10F) 	23	350	0.29	1.62	600	Foret en AR Ø21.5
Moyen de contrôle :	Rugosémetre, Pied à coulissé, jauge de profondeur					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES				
	Pièce : CORPS					
	Phase N° 800					
	Matière : XC38					
	Nombre : 01					
Désignation des opérations : FRAISSAGE						
Machine - outil : FRAISEUSE HORIZONTALE - PORTE PIECE – ETAU						
Mise en positions et désignation des opérations	Eléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Trois appuis plans sur 3 ▪ Deux appuis plans sur 5 ▪ Un seul appui sur 1 						
Opérations : <ul style="list-style-type: none"> ▪ 401 : Usinage de la Rainure (12F et 13F) 	20	1000	0.012	60	/	Fraise deux lèvres Ø6
Moyen de contrôle :	Pied à coulissé, jouge de profondeur					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES
	Pièce : CORPS	
Phase N° 900	Matière : XC38	
	Nombre : 01	

Désignation des opérations : **FRAISSAGE**

Machine - outil : **FRAISEUSE HORIZONTALE - PORTE PIECE – MANDRIN QUATRE MORS DOUX**



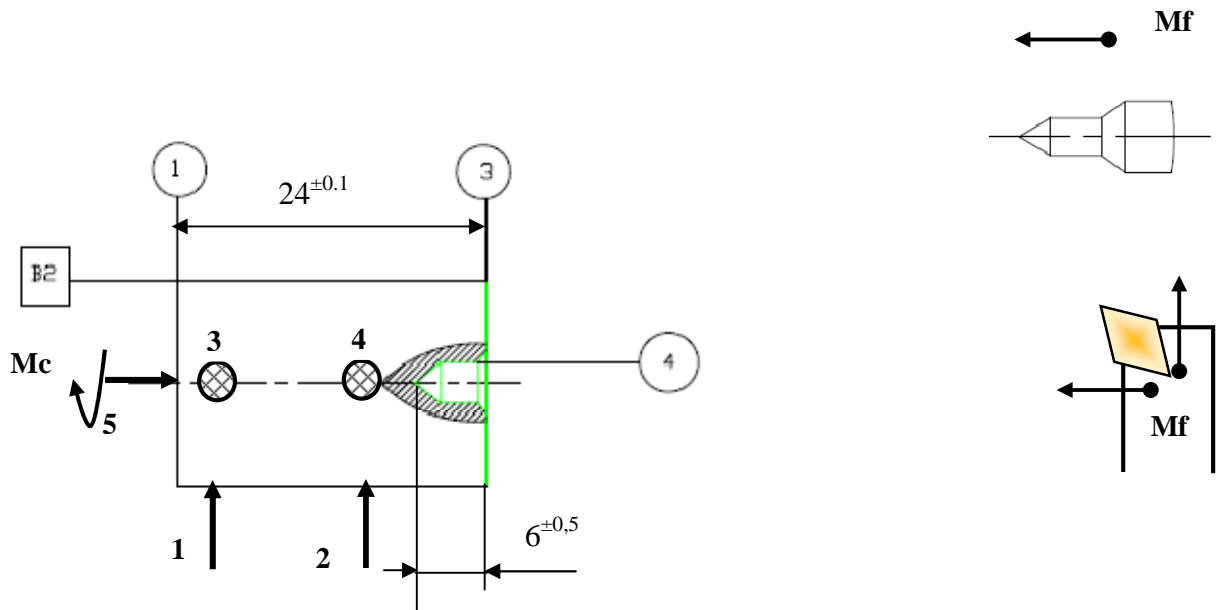
Mise en positions et désignation des opérations	Eléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Trois appuis plans sur 3 ▪ Deux appuis plans sur 5 ▪ Un seul appui sur 1 						
Opérations : <ul style="list-style-type: none"> ▪ 901: Chanfreiner (14F) 	23	350	0.37	800	/	Fraise deux lèvres Ø30
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 902 : Filetage (15F) 	75	1000	1.5	1500	/	Taraud en carbure
Moyen de contrôle	Pied à coulissé, écrou M24					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES				
	Pièce : MANCHON GUIDE					
Phase N° 200	Matière : BRONZE					
	Nombre : 01					
Désignation des opérations : TOURNAGE						
Machine - outil : TOUR PARALLELE - PORTE PIECE – MANDRIN TROIS MORS DOUX						
Rugosité Ra= 6,3						
Mise en positions et désignation des opérations	Eléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : ▪ Centrage long sur B2 ▪ Un seul appui sur B1						
Opérations : ▪ 201 : Dresser (1F) ▪ 402 : Centrage (2F)	100	1045	0.05	/	52	Outil en carbure
	15	375	/	/	/	Foret Ø4
Moyen de contrôle	Rugosémetre, Pied à coulissé, jouge de profondeur					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES
	Pièce : MANCHON GUIDE	
Phase N° 300	Matière : BRONZE	
	Nombre : 01	

Désignation des opérations : **TOURNAGE**

Machine - outil : **TOUR PARALLELE - PORTE PIECE – MANDRIN TROIS MORS DOUX**



3	//	0,2	1
---	----	-----	---

Rugosité Ra= 6,3

Mise en positions et désignation des opérations	Eléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : ▪ Centrage long sur B2 ▪ Un seul appui sur 1						
Opérations : ▪ 301 : Dresser (3F)	100	1045	0.05	/	52	Outil en carbure
▪ 302 : Centrage (4F)	15	375	/	/	/	Foret à centré Ø4
Moyen de contrôle	Rugosémetre, Pied à coulissé, jauge de profondeur					

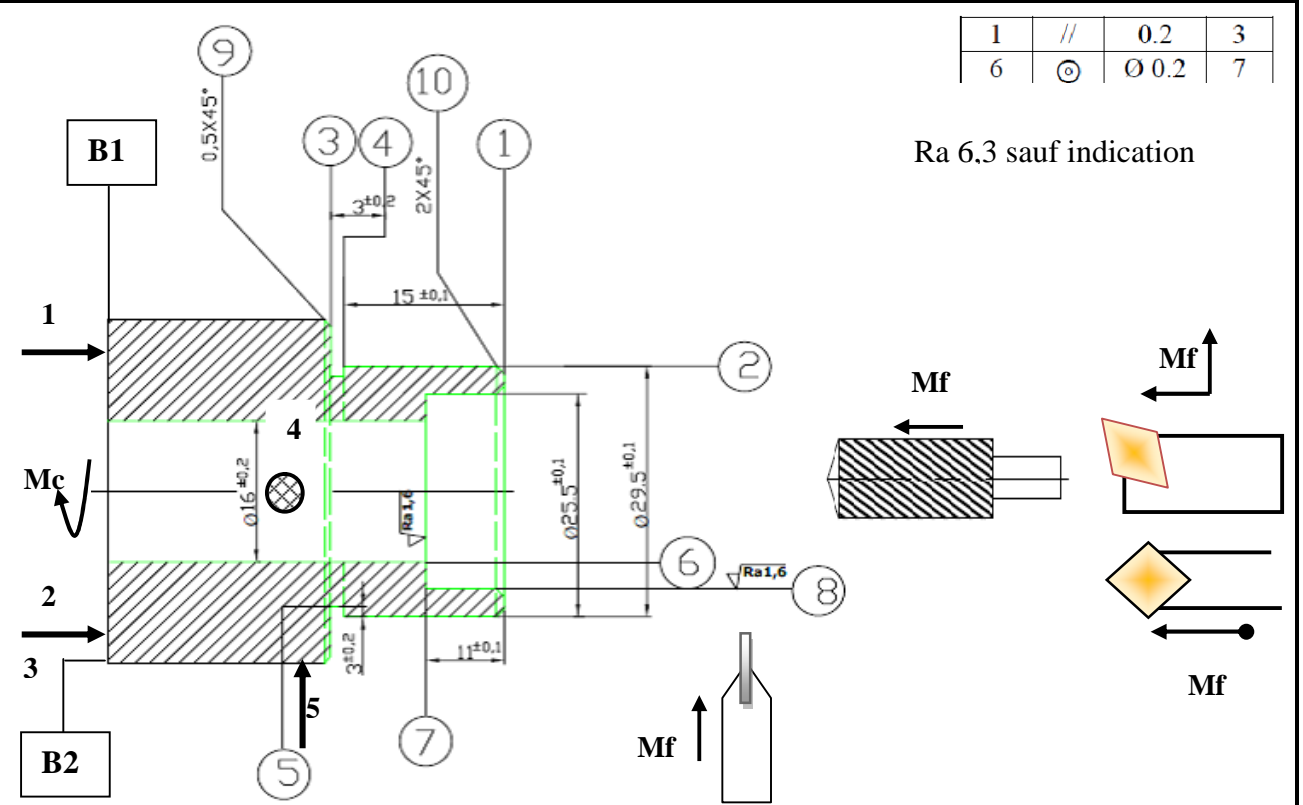
CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE					BUREAU DES METHODES
	Pièce : MANCHON GUIDE					
	Phase N° 400					
	Matière : BRONZE					
					Nombre : 01	
Désignation des opérations : TOURNAGE						
Machine - outil : TOUR PARALLELE - PORTE PIECE – MANDRIN TROIS MORS DOUX						
<p>Rugosité Ra= 0,8</p>						
Mise en positions et désignation des opérations	Eléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : ▪ Pointe fixe sur 4 ▪ Pointe mobile sur 2 ▪ Un seul appui sur 3						
Opérations : ▪ 401 : Charioter (5E)	95	1500	0.25	/	375	Outil en carbure
▪ 402 : Charioter (5F/2)	120	1500	0.125	/	187	
▪ 403 : Charioter (5F)	125	1500	0.025	/	37	
Moyen de contrôle	Pied à coulissé, Rugosémetre					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES				
	Pièce : MANCHON GUIDE					
Phase N° 500	Matière : BRONZE					
	Nombre : 01					
Désignation des opérations : TOURNAGE						
Machine - outil : TOUR PARALLELE - PORTE PIECE – MANDRIN TROIS MORS DOUX						
<p>Rugosité d'alésage Ra= 1,6 Chanfrein 7 : 0,5 x45°</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>6</td> <td>⊙</td> <td>Ø0.2</td> <td>5</td> </tr> </table>			6	⊙	Ø0.2	5
6	⊙	Ø0.2	5			
Mise en positions et désignation des opérations	Eléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : ▪ Centrage long sur 5 ▪ Un seul appui sur 3						
Opérations : ▪ 501 : Perçage (6E)	22	376	/	/	/	Foret Ø18
▪ 502 : Alésage (6F/2)	75	1045	0.18	/	196	Outil en carbure
▪ 503 : Alésage (6F)	75	1500	0.05	/	75	
▪ 504 : Chanfreiner (7F)	75	1500	/	/	/	
Moyen de contrôle	Pied à coulissé, Rugosémetre					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES
	Pièce : TETE D'OUTIL	
Phase N° 200	Matière : XC38	
	Nombre : 01	

Désignation des opérations : **TOURNAGE**

Machine - outil : **TOUR PARALLELE - PORTE PIECE – MANDRIN TROIS MORS DOUX**

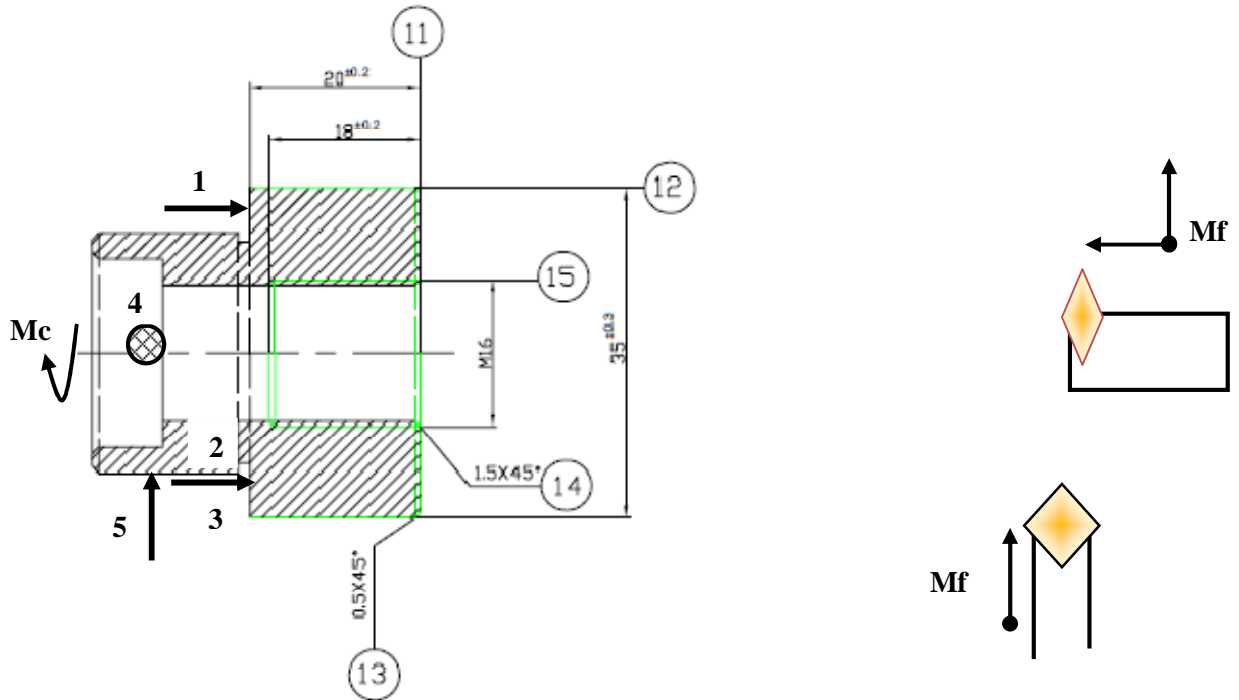


Mise en positions et désignation des opérations	Éléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : ▪ Trois appuis plans sur B1 ▪ Centrage court sur B2						
Opérations : ▪ 201 : Dresser (1F)	165	1500	0.375	/	562	Outil en carbure
▪ 202 : Charioter et Dresser (2F et 3F)	165	1500	0.125	/	187	Outil en carbure
▪ 203 : tronçonnage (3’F, 4F, 5F)	27	375	/	/	/	Outil en acier rapide
▪ 204 : Perçage (6F)	23	450	/	/	/	Foret Ø15, 5
▪ 205 : Alésage (8E)	65	1045	0.625	/	653	Alésoir en carbure
▪ 206 : Alésage (8F/2)	80	1045	0.125	/	130	Alésoir en carbure
▪ 207 : Alésage et dressage (7F, 8F)	80	1045	0.125	/	130	Outil en carbure
▪ 208 : Chanfreiner (9F, 10F, 17F)	165	1500	/	/	/	Outil en carbure
Moyen de contrôle	Pied à coulissé, jouge de profondeur, Rugosémetre					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES
	Pièce : TETE D'OUTIL	
Phase N° 300	Matière : XC38	
	Nombre : 01	

Désignation des opérations : **TOURNAGE**

Machine - outil : **TOUR PARALLELE - PORTE PIECE – MANDRIN TROIS MORS DOUX**



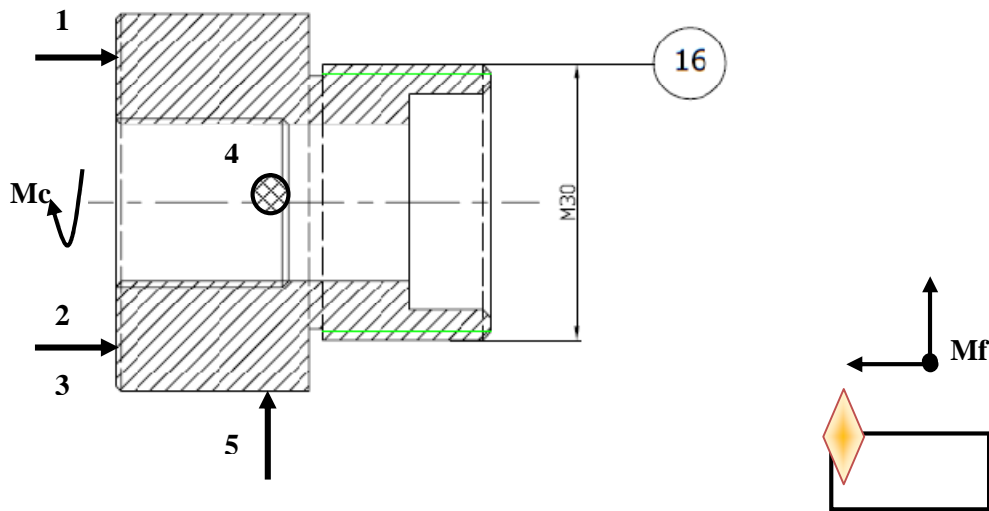
Rugosité Ra=6.3

Mise en positions et désignation des opérations	Éléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : ▪ Trois appuis plans sur 3 ▪ Centrage court sur 2						
Opérations : ▪ 301 : Dresser (11F)	165	1500	0.375	/	562	Outil en carbure
▪ 302 : Charioter (12F)	165	1500	0.125	/	187	Outil en carbure
▪ 303 : Chanfreiner (13F et 14F)	165	1500	/	/	/	Outil en carbure
▪ 304 : Taraudage (15F)	50	1045	1	/	1045	Outil en carbure
Moyen de contrôle	Pied à coulissé, vis M16, Rugosémetre					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES
	Pièce : TETE D'OUTIL	
Phase N° 400	Matière : XC38	
	Nombre : 01	

Désignation des opérations : **TOURNAGE**

Machine - outil : **TOUR PARALLELE - PORTE PIECE – MANDRIN TROIS MORS DOUX**

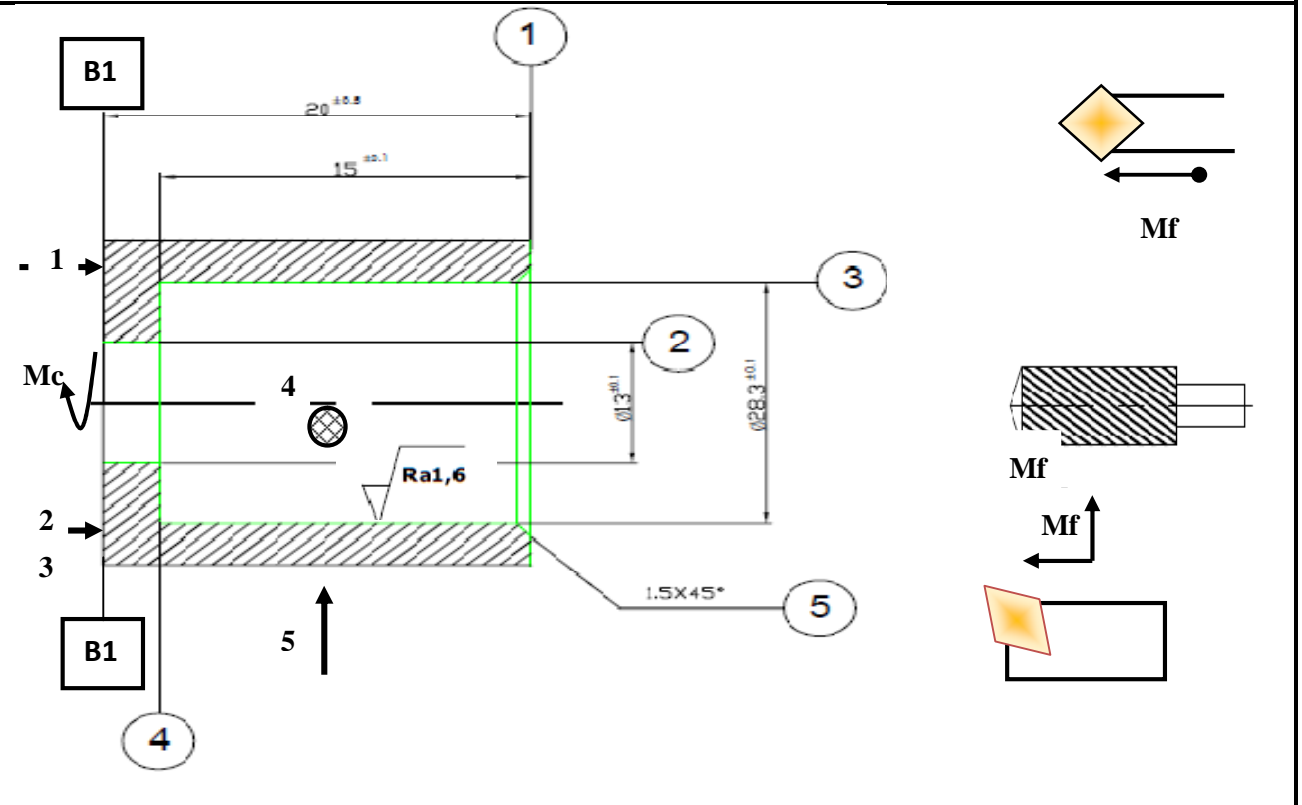


Mise en positions et désignation des opérations	Éléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : ■ Trois appuis plans sur 11 ■ Centrage court sur 12						
■ 402 : Filetage (16F)	50	520	1	/	520	Outil en carbure
Moyen de contrôle	Pied à coulissé, écrou M30					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES
	Pièce : COUVERCLE DE L'OUTIL	
Phase N° 200	Matière : XC38	
	Nombre : 01	

Désignation des opérations : **TOURNAGE**

Machine - outil : **TOUR PARALLELE - PORTE PIECE – MANDRIN TROIS MORS DOUX**



Rugosité Ra 6,3 sauf indication

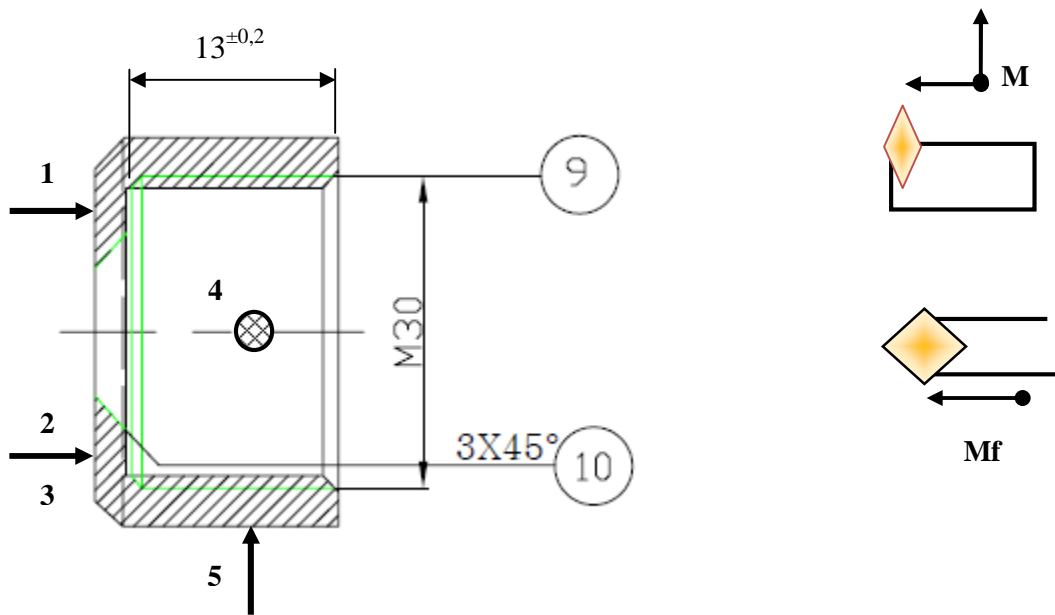
3	⊙	∅ 0.1	2
---	---	-------	---

Mise en positions et désignation des opérations	Eléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : ▪ Trois appuis plans sur B1 ▪ Centrage court sur B2						
Opérations : ▪ 201 : Dresser (1F)	128	1045	0.25	/	261	Outil en carbure
▪ 202 : Perçage (2F)	23	376	0.20	/	74	Foret ∅15, 5
▪ 203 : Alésage (3E)	65	745	0.31	/	232	Outil en carbure
▪ 204 : Alésage (3F/2)	65	745	0.25	/	186	Outil en carbure
▪ 205 : Alésage et Dresser (3F et 4F)	65	745	0.125	/	93	Outil en carbure
▪ 206 : Chanfreiner (5F)	65	745	/	/	/	Outil en carbure
Moyen de contrôle	Pied à coulissé, jouge de profondeur, Rugosétre					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES
	Pièce : COUVERCLE DE L'OUTIL	
Phase N° 300	Matière : XC38	
	Nombre : 01	

Désignation des opérations : **TOURNAGE**

Machine - outil : **TOUR PARALLELE - PORTE PIECE – MANDRIN TROIS MORS DOUX**

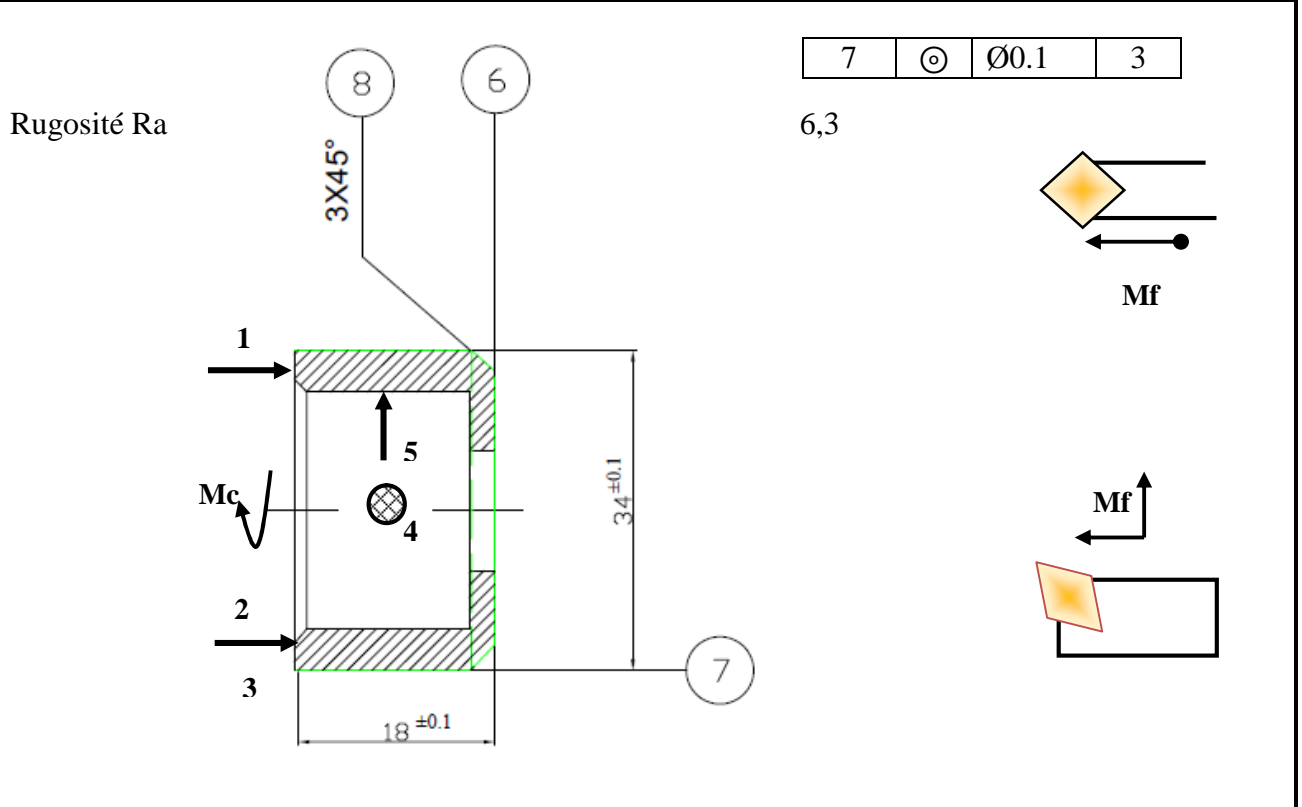


Mise en positions et désignation des opérations	Éléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : ▪ Trois appuis plans sur 6 ▪ Centrage court sur 3						
Opérations : ▪ 401 : Chanfreiner (10F)	65	1500	/	/	/	Outil en carbure
▪ 402 : Taraudage (9F)	50	520	1	/	520	Outil en carbure
Moyen de contrôle	Pied à coulissé, vis M30					

CONTRAT DE PHASE	Ensemble : OUTIL DE GALETAGE	BUREAU DES METHODES
	Pièce : COUVERCLE DE L'OUTIL	
Phase N° 400	Matière : XC38	
	Nombre : 01	

Désignation des opérations : **TOURNAGE**

Machine - outil : **TOUR PARALLELE - PORTE PIECE – MANDRIN TROIS MORS DOUX**



Mise en positions et désignation des opérations	Éléments de coupe					Outillage de coupe
	Vc m/min	N tr/min	f mm/tr	fz mm/dt	Vf mm/min	
Mise en position : ▪ Trois appuis plans sur 1 ▪ Centrage court sur 3						
Opérations : ▪ 301 : Dresser (6F)	128	1045	0.25	/	261	Outil en carbure
▪ 302 : Charioter (7F)	165	1500	0.25	/	375	Outil en carbure
▪ 303 : Chanfreiner (8F)	165	1500	/	/	/	Outil en carbure
Moyen de contrôle	Pied à coulissé, Rugosétre					

III.11 Conclusion

Le contrat de phase (CPH) de fabrication de L'outil de galetage à bille est un document contractuel entre le bureau des méthodes, qui le rédige, et l'atelier de fabrication qui l'applique. Il détaille les opérations d'usinage d'une phase définie dans l'avant-projet d'étude de fabrication. Ce document est évolutif en fonction du poste d'usinage de la stabilisation. Lorsque le poste d'usinage est stabilisé, en tenant compte des résultats des essais (choix d'outils ou de conditions de coupe différents), le document portera le nom de contrat de phase définitif ou stabilisé.

CHAPITRE IV :

*Effet du galetage sur la
rugosité d'un acier
X8CrNiS18-9*

IV.1 Plans d'expériences

IV.1.1 Introduction

Le comportement des produits industriels est généralement en fonction de nombreux phénomènes, souvent dépendants les uns des autres. Pour prévoir ce comportement, le produit et les phénomènes sont modélisés, et des simulations sont effectuées ; la pertinence des résultats des simulations dépend de la qualité des modèles.

En particulier, dans le cadre de la conception ou ré-conception d'un produit, les modèles font généralement intervenir un certain nombre de grandeurs physiques que l'on s'autorise à modifier, appelées paramètres. Le problème du concepteur est alors de trouver les « bonnes » valeurs de ces paramètres, c'est-à-dire celles qui feront que le produit aura le comportement attendu ; cela nécessite d'identifier l'influence des paramètres sur la réponse du produit. Cela passe généralement par des études expérimentales, consistant à imposer différentes valeurs de ces paramètres et à mesurer les réponses obtenues.

Or, ces essais sont coûteux, et ce d'autant plus que le nombre de paramètres à faire varier est important. En effet, la modification d'un paramètre peut par exemple exiger un démontage et un remontage du produit, ou bien la fabrication de plusieurs prototypes différents (cas d'une pièce produite en série), ou encore l'interruption de la production pour changer d'outil (cas d'un procédé de fabrication), etc. Le coût d'une étude expérimentale dépend donc du nombre et de l'ordre des essais effectués.

Les plans d'expériences consistent à sélectionner et ordonner les essais afin d'identifier, à moindres coûts, les effets des paramètres sur la réponse du produit. Il s'agit de méthodes statistiques faisant appel à des notions mathématiques simples. La mise en œuvre de ces méthodes comporte trois étapes :

- Postuler un modèle de comportement du système (avec des coefficients pouvant être inconnus) ;
- Définir un plan d'expériences, c'est-à-dire une série d'essais permettant d'identifier les coefficients du modèle ;
- Faire les essais, identifier les coefficients et conclure.

Cette méthode des plans d'expériences est basée sur des règles mathématiques strictes et elle exige une démarche rigoureuse. Les plans d'expériences présentent beaucoup d'avantages comme la possibilité d'utiliser un grand nombre de facteurs, évaluer des représentations graphiques des réponses obtenues à la sortie en fonction des paramètres d'entrées (Fig IV.1) et d'utiliser un modèle mathématique répondant aux objectifs à atteindre suivant le besoin[30].

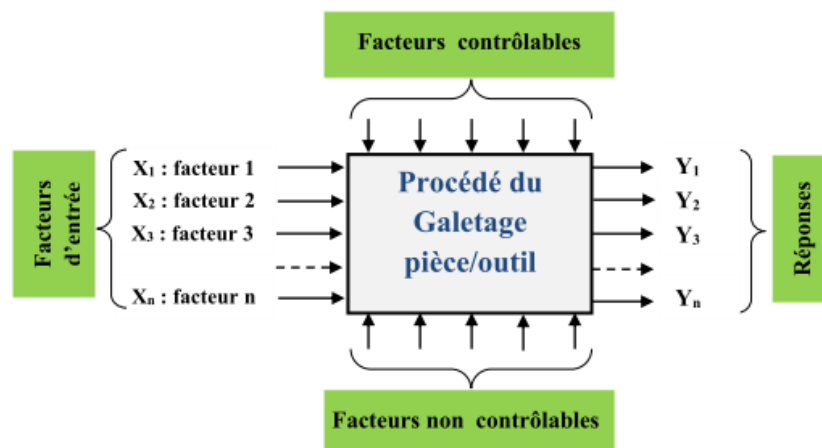


Figure IV.1 Schéma de l'expérimentation

Parmi les facteurs on distinguera :

- les facteurs contrôlables qui dépendent directement du choix du technicien (pression, température, matériau, etc.) ;
- les facteurs non contrôlables qui varient indépendamment du choix du technicien (conditions climatiques, environnement d'utilisation, etc.) ;
- les facteurs d'entrée dont on cherche à analyser leur influence dans notre travail (vitesse de rotation, profondeur de passe, nombre de passe et l'avance de l'outil) ;
- La réponse (rugosité et la dureté de surface) objectif à atteindre dans ce travail, est la grandeur mesurée à chaque essai ; le plan vise à déterminer quels facteurs l'influencent ou quelle est son évolution en fonction de ceux-ci. Cette grandeur est le plus souvent mesurable mais elle peut également être qualitative[31].

IV.1.2 Définition

Un plan d'expérience est un plan d'organisation et d'optimisation des essais expérimentaux pour obtenir le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences et la meilleure précision possible sur les réponses calculées avec le modèle qui exprime le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt, y , et des variables, x_i , qui peuvent modifier la valeur de y . Afin de réaliser un bon plan d'expérience on doit respecter les étapes suivantes :

- Formalisation du problème ;
- Choix et construction du plan retenu ;
- Réalisation des essais ;
- Traitements statistiques ;
- Interprétation des résultats.

IV.1.3 Espace expérimental

Lorsqu'un plan d'expérience est constitué de deux variables ou plus exactement de deux facteurs (x_i) ces derniers peuvent modifier et influencer une grandeur d'intérêt appelée réponse (y). La variation des facteurs est limitée entre une borne supérieure et une borne inférieure appelées respectivement niveau haut (+1) et niveau bas (-1) (Fig. IV.2.a).

L'ensemble des valeurs que peut prendre un facteur entre son niveau bas et son niveau haut est appelé « domaine de variation ». Les deux domaines de variation des deux facteurs sont tracés chacun sur un axe gradué de façon qu'ils forment un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions appelé « l'espace expérimental » (Fig. IV.2.b).

La réunion des domaines de variation de chaque facteur définit le « domaine d'étude » qui représente une partie de l'espace expérimental retenu par l'expérimentateur pour faire ses essais, qui est représentée par une série de points disposés dans le domaine d'étude (Fig. IV.2.c).

Dans les plans d'expériences les facteurs employés pour réaliser une étude expérimentale sont généralement des variables continues (les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus). Mais il existe d'autres types de variables qui ne sont pas continués tels que :

- **Facteurs discrets** : ils ne peuvent prendre que des valeurs particulières, exemple de couleurs d'un produit : bleu, jaune et rouge sont des facteurs discrets.
- **Facteurs ordonnables** : sont considérés comme des facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit, ou encore premier, deuxième, troisième et quatrième.
- **Facteurs booléens** : sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs : bas ou haut, ouvert ou fermé, noir ou blanc, etc.

Les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et y est la valeur de la réponse en ce point. À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse, l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée « surface de réponse » (Fig. IV.2.d).

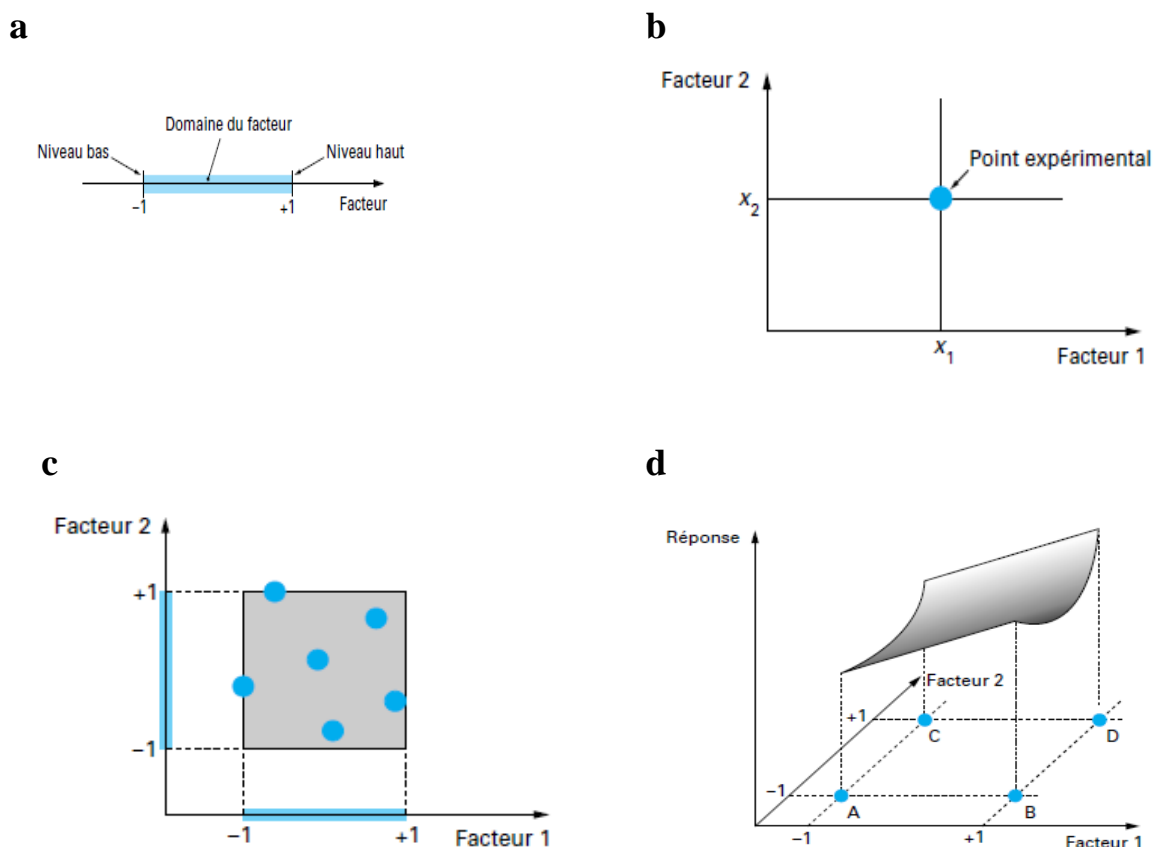


Figure IV. 2 Espace expérimental et domaine d'étude [32].

IV.2 Modélisation par les plans d'expériences

La modélisation est l'objet même des plans d'expériences. Elle permet une fois que les facteurs influents sont identifiés, de trouver l'équation ou la fonction qui décrit au mieux les variations du phénomène étudié en fonction de ces facteurs.

Toute réponse expérimentale peut être écrite sous la forme suivante :

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) + \varepsilon \tag{IV. 1}$$

Réponse
Expérimentale
Facteurs
contrôlés
Erreur
expérimentale

Où f est une fonction inconnue (modèle théorique) des facteurs influents contrôlés $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$.

Cette fonction, inaccessible par l'expérience, ne peut être qu'estimée par lissage à l'aide de polynômes. L'idée de base présidant à ce choix étant qu'au voisinage d'un point, toute fonction peut être développée en série de Taylor et donc remplacée par un polynôme.

L'équation de régression obtenue sur la base de l'expérience, s'écrit sous la forme suivante:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{\substack{u,j=1 \\ u \neq j}}^k b_{uj} x_u x_j + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 \quad (\text{IV. 2})$$

Où x_j , avec ($j = 1, \dots, k$) sont les coordonnées des facteurs b_j exprimées en variables centrées réduites, \hat{y} est l'estimée (valeur prédite par le modèle) de y (valeur expérimentale). Chaque valeur expérimentale y_i est sujette aux erreurs aléatoires ε_i à distribution normale telle que:

$$y_i = \hat{y}_i + \varepsilon_i \quad (\text{IV. 3})$$

Avec :

b_0 : Terme constant de l'équation de régression;

b_j : Effets linéaires;

b_{uj} : Effets d'interactions ;

b_{jj} : Effets quadratiques.

Dans les modèles cités précédemment les facteurs sont généralement exprimés soit en variables d'origine A ou en variables centrées réduites (v.c.r) X , le passage des variables d'origine aux variables centrées réduites est donnée par la formule suivante (avec A_0 étant la valeur centrale en unités courantes) :

$$x = \frac{A - A_0}{pas} \quad (\text{IV. 4})$$

L'intérêt des v.c.r ou unités codées est de pouvoir présenter les plans d'expériences de la même manière quels que soient les domaines d'étude retenus et quels que soient les facteurs et ils sont aussi répandue dans les logiciels de plans d'expériences et certaines opérations comme la recherche des meilleurs points d'expériences par le critère de D-optimalité qui ne sont réalisables qu'avec ces variables [33].

Les coefficients de l'équation sont déterminés par la méthode des moindres carrés à partir de la condition :

$$\varphi = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 = \min \quad (\text{IV. 5})$$

Où N est l'étendue de l'échantillon pris sur l'ensemble des valeurs des paramètres à analyser.

Une condition nécessaire pour que $\varphi(b_0, b_1, b_2 \dots)$ soit minimale est que les égalités suivantes soient vérifiées :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial b_0} = 0, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial b_1} = 0, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial b_2} = 0, \quad \dots \tag{IV.6}$$

$$\sum_{i=1}^N 2[y_i - f(x_i, b_0, b_1, b_2, \dots)] \frac{\partial f(x_i)}{\partial b_0} = 0 \tag{IV.7}$$

donc :

$$\sum_{i=1}^N 2[y_i - f(x_i, b_0, b_1, b_2, \dots)] \frac{\partial f(x_i)}{\partial b_1} = 0 \tag{IV.8}$$

IV.2.1 Matrice d'expériences

Il est maintenant possible d'introduire la matrice des expériences qui traduit les niveaux à assigner à chaque facteur pour chacun des essais. Le tableau IV.1 suivant présente une matrice d'expériences pour trois facteurs à deux niveaux.

N° Essai	Facteur A	Facteur B	Facteur C	Facteur D	Réponses
	x_1	x_2	x_3	x_4	y
1	-1	-1	-1	-1	y_1
2	1	-1	-1	-1	y_2
3	-1	1	-1	-1	y_3
4	1	1	-1	-1	y_4
5	-1	-1	1	-1	y_5
6	1	-1	1	-1	y_6
7	-1	1	1	-1	y_7
8	1	1	1	-1	y_8
9	-1	-1	-1	1	y_9
10	1	-1	-1	1	y_{10}
11	-1	1	-1	1	y_{11}
12	1	1	-1	1	y_{12}
13	-1	-1	1	1	y_{13}
14	1	-1	1	1	y_{14}
15	-1	1	1	1	y_{15}
16	1	1	1	1	y_{16}

Tableau IV.1 : Matrice d'expériences.

A, B, C, D, sont les facteurs qui correspondent respectivement aux variables centrées réduites x_1, x_2, x_3, x_4 .
 y est la réponse étudiée.

IV.2.2 Matrice des effets

La matrice $[X]$ des effets (voir l'annexe) servant au calcul des coefficients du modèle, s'obtient en ajoutant à gauche de la matrice d'expériences, une colonne ne contenant que des 1, correspondant à la variable fictive x_0 . Les autres colonnes qui correspondent aux interactions des différents facteurs s'obtiennent en effectuant le produit ligne à ligne des colonnes des facteurs correspondants.

IV.2.3 Calcul des coefficients du modèle

IV.2.3.1 Analyse de régression sous forme matricielle

L'analyse de régression sous forme matricielle est d'un emploi commode pour la résolution des problèmes sur ordinateur. Il s'agit de trouver par la méthode des moindres carrés les coefficients de l'équation de régression suivante :

$$\hat{y} = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k$$

Où x_0 est une variable fictive égale à 1

Présentons sous forme matricielle le matériel statistique de départ :

$$[X] = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{k1} \\ x_{02} & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{0N} & x_{1N} & x_{2N} & \dots & x_{kN} \end{bmatrix}$$

Cette matrice est appelée matrice des variables indépendantes.

Soit Y le vecteur des observations :

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}$$

Introduisons la matrice colonne des coefficients B .

$$B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix}$$

La matrice transposée de $[X]$ est la suivante :

$$[X]^T = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{02} & \dots & x_{0N} \\ x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{k1} & x_{k2} & \dots & x_{kN} \end{bmatrix}$$

Le système d'équations normales destiné à déterminer $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ est le suivant :

$$\begin{aligned} & b_0 \sum_{i=1}^N x_{0i}^2 + b_1 \sum_{i=1}^N x_{0i}x_{1i} + \dots + b_k \sum_{i=1}^N x_{0i}x_{ki} = \sum_{i=1}^N x_{0i}y_i \\ & b_0 \sum_{i=1}^N x_{1i}x_{0i} + b_1 \sum_{i=1}^N x_{1i}^2 + \dots + b_k \sum_{i=1}^N x_{1i}x_{ki} = \sum_{i=1}^N x_{1i}y_i \\ & \dots \\ & b_0 \sum_{i=1}^N x_{ki}x_{0i} + b_1 \sum_{i=1}^N x_{ki}x_{1i} + \dots + b_k \sum_{i=1}^N x_{ki}^2 = \sum_{i=1}^N x_{ki}y_i \end{aligned} \quad (\text{IV. 9})$$

On peut aussi l'écrire sous forme matricielle comme suit:

$$[X^T X]B = [X]^T Y,$$

avec

$$[X^T X] = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_{0i}^2 & \sum_{i=1}^N x_{0i}x_{1i} & \dots & \sum_{i=1}^N x_{0i}x_{ki} \\ \sum_{i=1}^N x_{1i}x_{0i} & \sum_{i=1}^N x_{1i}^2 & \dots & \sum_{i=1}^N x_{1i}x_{ki} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^N x_{ki}x_{0i} & \sum_{i=1}^N x_{ki}x_{1i} & \dots & \sum_{i=1}^N x_{ki}^2 \end{bmatrix}$$

et

$$[X]^T Y = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_{0i}y_i \\ \sum_{i=1}^N x_{1i}y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N x_{ki}y_i \end{bmatrix}$$

Le vecteur solution des coefficients B, s'obtient à partir du produit suivant :

$$B = [X^T X]^{-1} [X]^T Y.$$

Où $[X^T X]^{-1}$ est la matrice inverse de la matrice $[X^T X]$.

IV.3 Plans factoriels complets à deux niveaux (2^k)

IV.3.1 Définition

Ce sont les plus utilisés car les plus simples et les plus rapides à mettre en œuvre. Ils sont notés 2^k où le 2 correspond aux niveaux maximal et minimal qui délimitent le domaine d'étude d'un facteur et k est le nombre de facteurs étudiés. Pour un plan factoriel complet à k facteurs, il va donc falloir mener 2^k expériences. Le principe consiste alors à répartir, de façon optimale, les essais dans le domaine expérimental. Soit par exemple un plan factoriel complet à 3 facteurs noté 2^3 . Les points expérimentaux seront aux sommets d'un cube (fig.IV.3) et la matrice des expériences sera un tableau traduisant l'emplacement de ces points en indiquant leurs trois coordonnées en variables centrées réduites.

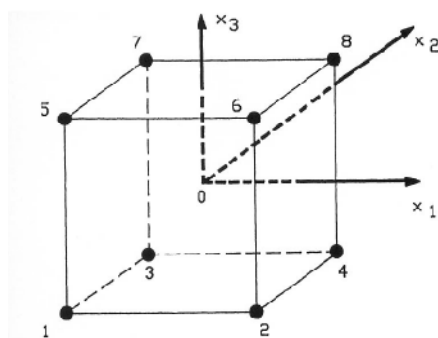


Figure IV.3 :Disposition des points expérimentaux d'un plan 2^3

IV.3.2 Avantages des plans factoriels complets:

Les avantages des plans factoriels complets sont nombreux et nous n'en citerons que les principaux:

- Les plans factoriels sont faciles à construire;
- Comme chaque facteur ne prend que deux niveaux les essais sont faciles à contrôler et les risques d'erreurs sont minimisés;
- Le calcul des effets et des interactions est très simple et ne demande pas d'outils informatiques évolués;
- En les employant l'expérimentateur est sûr d'avoir la procédure expérimentale optimale puisque ces plans sont basés sur de matrices d'Hadamard et qu'il a été démontré que l'on ne pouvait pas faire mieux;
- L'interprétation des résultats est à la portée de tout expérimentateur et ne demande pas de connaissances approfondies en statistiques;
- La modélisation mathématique est immédiate;

- Les résultats obtenus avec un premier plan peuvent être utilisés en partie ou en totalité soit, pour explorer une autre zone du domaine expérimental soit, pour établir un modèle mathématique de degré plus élevé.

Le seul inconvénient de ces plans est qu'ils obligent rapidement à faire beaucoup d'essais. Par exemple, pour étudier simplement six facteurs il faut réaliser 64 expériences. Ce qui est prohibitif. Cela est d'autant plus regrettable que l'on s'aperçoit souvent, au moment de l'interprétation, que beaucoup d'essais ont été réalisés pour rien. En effet, de nombreuses interactions sont nulles et certains facteurs sont sans influence. C'est pour palier cet inconvénient que les plans factoriels fractionnaires ont été développés.

IV.4 Analyse de la variance « ANOVA »

L'analyse de la variance est un outil statistique très important qui permet de déterminer certains étalons afin d'évaluer ou tester l'importance des coefficients et leurs interactions d'un modèle postulé déterminé par l'expérimentateur. Pour déterminer cet étalon on doit tout d'abord déterminer la somme des résidus au carré ($\sum r_i^2$) donnée par la relation 10 qui représente la relation de base de l'analyse de variance[34] :

$$\sum r_i^2 = \sum (y_i - \bar{y})^2 - \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{IV. 10})$$

Avec :

- $\sum (y_i - \bar{y})^2$: Somme au carré des réponses mesurées à la moyenne (\bar{y}).
- $\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$: Somme au carré des réponses calculées à la moyenne (\bar{y}).

Donc la somme au carré des résidus est la plus faible valeur de la somme des carrés des écarts c'est-à-dire la somme au carré du manque d'ajustement (Δ) et de l'erreur expérimentale (σ), donné comme suit :

$$\sum r_i^2 = \text{Minimum de } \sum e_i^2 = \text{Minimum de } \sum (\Delta + \sigma)^2 \quad (\text{IV. 11})$$

Lorsqu'on divise la somme au carré des résidus par le nombre de degrés de liberté (ddl), on obtient la variance des résidus $V(r_i)$ donnée par la relation 12 :

$$V(r_i) = \text{Minimum de } V(e) = \frac{1}{n-p} \sum_{i=1}^{i=n} r_i^2 \quad (\text{IV. 12})$$

Cette dernière relation de l'analyse de la variance $V(r_i)$ divisée par le nombre de réponses n va servir à calculer la variance des coefficients, qui représente un étalon pour tester si un coefficient est significatif ou non :

$$V(a_i) = \frac{1}{n}V(e) = \frac{1}{n}V(r_i) \quad (\text{IV. 13})$$

La racine carrée de la variance des coefficients de la relation 13 donne une valeur appelée écart-type du coefficient qui est la valeur de comparaison recherchée. Le rapport entre chaque coefficient du modèle postulé déterminé et son écart-type en faisant le rapport a_1/σ_{a_1} , ce rapport est appelé « t de Student », donc à partir de cette valeur on peut évaluer la probabilité que le coefficient testé soit peu significatif ou significatif, cette probabilité est appelée « p-value ». Donc chaque valeur de t de Student pour n'importe quel coefficient testé du modèle déterminé est associé par une p-value [35].

Le critère « F de Fisher » est une autre grandeur statistique très importante analogue au critère « t de Student » qu'on peut déterminer à partir de l'ANOVA. Le F de Fisher représente le rapport du carré moyen du modèle (somme au carré des réponses calculées à la moyenne sur le nombre de degrés de liberté qui représente le nombre de réponses mesurées moins 1) à celui des résidus (la différence entre somme au carré des réponses mesurées à la moyenne et celle calculées à la moyenne sur le nombre de degrés de liberté qui représente la différence entre le nombre de réponses mesurées et le nombre de coefficients du modèle retenus). Ce rapport permet de calculer la probabilité que ces deux carrés ne soient pas égaux. En d'autres termes, si le F de Fisher est élevé (faible probabilité que le modèle soit celui de la moyenne), les variations des réponses mesurées sont bien dues aux variations des facteurs. L'analyse de la variance permet aussi de valider les modèles mathématiques par une valeur appelée coefficient de corrélation « R^2 » qui représente le rapport entre la somme au carré des réponses calculées à la moyenne et la somme au carré des réponses mesurées à la moyenne donnée par la relation suivante :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{i=n} (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{IV. 14})$$

Le coefficient de corrélation « R^2 » est une mesure de la qualité d'un modèle, plus le coefficient est élevé plus le modèle déterminé par l'expérimentateur est adéquat.

L'analyse de la variation est devenue facile à être appliqué pour n'importe quel type de plan d'expérience avec l'apparition de logiciel de calcul tel que Design expert ainsi que les tableurs tel que Minitab qui possèdent des programmes permettant de construire aisément les tableaux de l'analyse de la variation.

IV.5 Equipements utilisés

Dans cette partie nous présentons l'ensemble des matériels et outils mis en œuvre pour la réalisation des expériences et cela dans le souci de caractériser le comportement des matériaux étudiés. Cela va consister en une présentation des différents équipements et appareils utilisés qui ont servi aux opérations de traitement mécanique, la mesure de la rugosité.

IV.5.1 Matériau

Les poutres utilisé dans ce travail est l'acier X8CrNiS18-9 fourni sous forme de barres cylindriques. Cet acier comme tous les aciers à moyen carbone s'emploie dans la construction mécanique après normalisation, amélioration et trempe superficielle, pour une variété de pièces (l'outil d'impression offset et taille douce, vilebrequins, arbre à cames, etc.).

IV.5.1.1 Composition chimique et microstructure

L'analyse du matériau a été réalisée au niveau du laboratoire de l'HOTEL DES MONAIES (la banque d'Algérie), machine FICHERSCOP X-RAY fabriqué en Allemand, les résultats sont indiqués dans le tableau IV.2

Dénomination		Euronorm : X8CrNiS18-9			AFNOR : Z8CNF18-09			
Finition		Acier rond de précision sans surépaisseur d'usinage.						
Composition chimique AFNOR : Z8CNF18-09 (valeur indicative en % du poids)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	N
0,09	0,95	1,56	0,040	0,25	16,00	9,00	0,77	0,11

Tableau IV.2 : Composition chimique de X8CrNiS18-9

IV.5.1.2 Caractéristiques mécaniques

Les essais de traction ont été effectués au laboratoire de l'HOTEL DES MONAIES (la banque d'Algérie), les résultats sont indiqués au tableau suivant :

Module de Young	Rm	Re0,2	A
200.10^3 N/mm^2	$646,4 \text{ N/mm}^2$	$325,5 \text{ N/mm}^2$	17%

Tableau IV.3 : Caractéristiques mécaniques de X8CrNiS18-9

IV.5.2 Machine-outil

Les essais préliminaires ont été réalisés sur un tour universel, GALLIC16N type DA 260x1500, fabriqué en Italie (fig. IV.4).



Figure IV.4 Tour universel GALLIC16N

Caractéristiques de la machine-outil sont consignées sur le tableau IV.

Dmax (mm)	Distance maximal entre pointe (mm)	Diamètre de passage dans la broche (mm)	Avance mm/tr	Vitesse de rotation trs /min	Puissance de la machine KW
200	1500	52	0,072 – 4,038	33 - 1500	11,5 Kw

Tableau IV.4 Caractéristiques de la machine-outil.

IV.5.3 Description du dispositif de galetage

Le dispositif se compose de deux parties.

- 1) Partie non active (corps) : permet l'étalonnage et l'affichage des valeurs de la force. Celle-ci est réglée, en fixant la raideur du ressort par l'intermédiaire d'une vis. Cette raideur est enregistrée sur le corps de l'outil par des repères 1,2 et a pour but d'enregistrer la valeur de la pression étalonnée sur le même corps (repère 2).
- 2) Partie active : partie en contact avec la surface à galetter, appelée « galet », il est en Bille en Acier 100C6 d'une dureté HB : 250, avec un diamètre de courbure de contacte $d = 16,64$ mm. L'étalonnage de la force de galetage est réalisé par l'application successive des poids de différentes

masses, les déplacements des repères 1 (repère de référence), en fonction des poids appliqués, étant indiqués par des positions relatives marquées sur le corps du dispositif.

IV.5.4 Préparation des éprouvettes

Le matériau sont en forme de cylindre de longueur $L= 205$ mmet de diamètre $\varnothing = 30$ mm, Pour éviter le problème du fléchissement et pour assurer une bonne rigidité durant le travail les éprouvettes brutes doivent être fixées sur le tour avec un montage mixte (mandrin + contre pointe) voir la fig. IV.5).

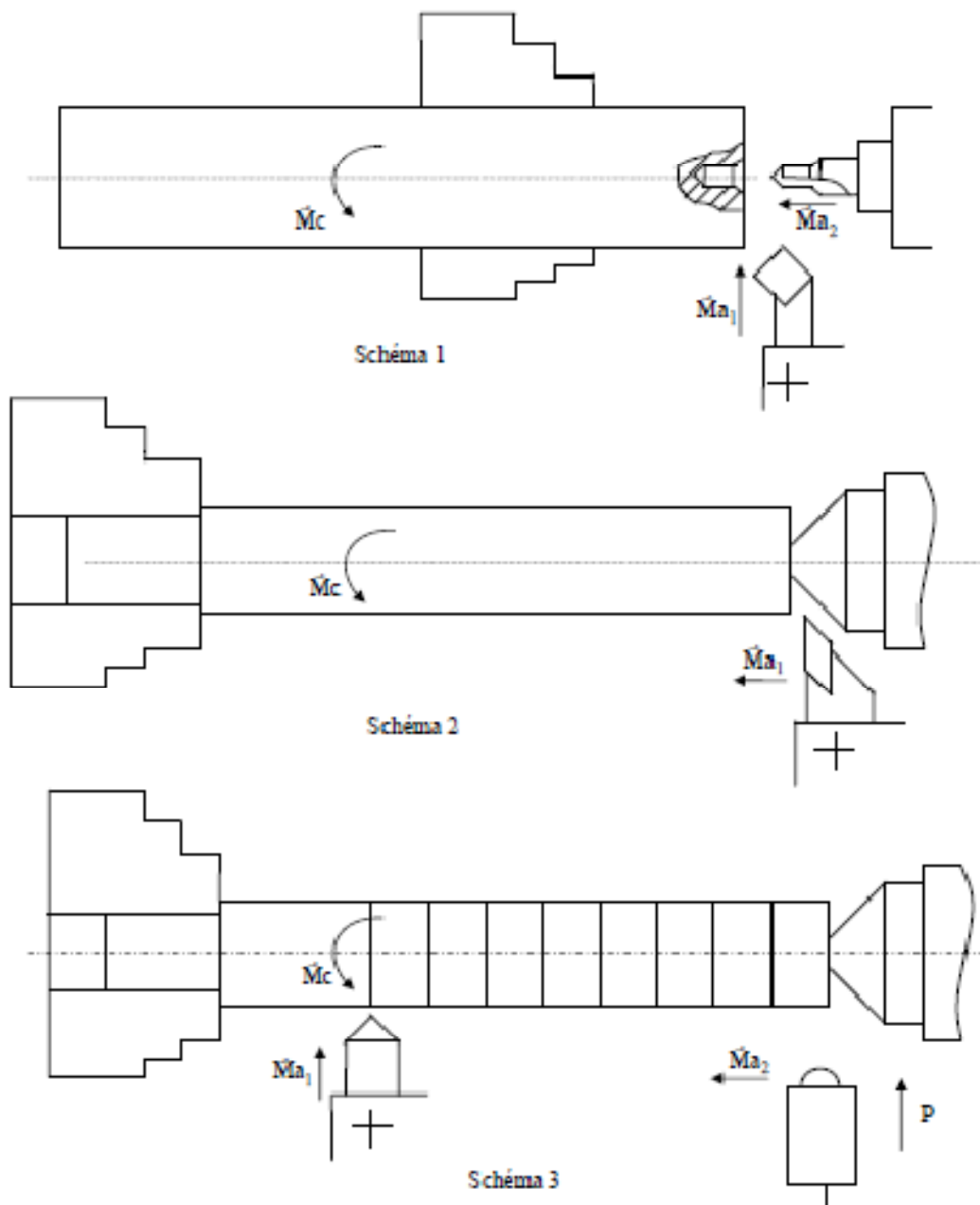


Figure IV.5 Routage d'usinage pour l'acier

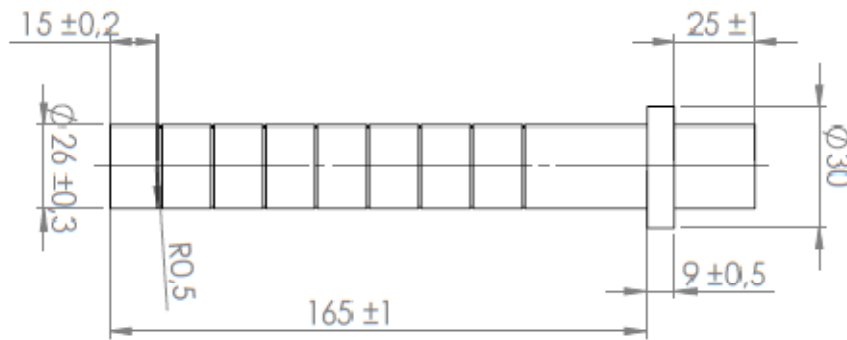


Figure IV.6 Dessin définition de l'éprouvette

Pour obtenir des éprouvettes identiques aux dimensions conformes au dessin de définition présenté ci-dessus pour les trois types d'acier, on a suivi le même routage d'usinage, soit :

- 1) sciage : le sciage se fait à l'aide d'une scie mécanique pour obtenir des barres brutes de longueur $L : 205 \text{ mm}$ et de diamètre $\varnothing = 30 \text{ mm}$ pour les trois types d'acier.
- 2) Tournage :
 - Dressage et centrage des bouts de l'éprouvette,
 - Chariotage d'ébauchage pour les éprouvettes en acier pour avoir un diamètre $\varnothing = 26 \text{ mm}$
- 3) Galetage : avec une rugosité $Ra = 2,41 \mu\text{m}$ pour les différents types d'acier les éprouvettes sont divisées en huit intervalles égaux de 15 mm pour l'application des différents régimes de galetage, La séparation entre les intervalles de galetage, est réalisée à l'aide d'un outil de tournage.

IV.5.5 Appareil de mesure de Rugosité

La mesure de la rugosité a été réalisée au moyen d'un Rugosimètre électronique suffisamment sensible qui est montré dans la fig. IV.7.

Type : SURFTEST SJ-410 Mitutoyo, fabriqué en japon.



Figure IV.7 Appareil de mesure des états de surface (SURFTEST SJ-410 Mitutoyo)

L'appareil de mesure de la rugosité de surface possède les caractéristiques techniques suivantes [36] :

- Détermination de R_a , R_q , R_{sk} , R_{dq} , R_z , R_y , R_p , R_c , R_t etc.
- Précision $\pm 15\%$
- Rayon de la sonde $2\ \mu\text{m}$
- Force de mesure $0,75\ \text{mN}$
- Poids $200\ \text{gr}$.

Plage R_a en μm	Valeur d'échantillonnage L en mm	Valeur min. des longueurs d'évaluation (L_n en mm)
$0,006 < R_a \leq 0,02$	0,08	0,50
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2,0$	0,80	4,00
$2,0 < R_a \leq 10,0$	2,50	12,50
$10,0 < R_a \leq 80,0$	8,00	40,00

Tableau IV.5: Valeur d'échantillonnage d'évaluations standards pour la détermination de R_a

IV.6 Analyse et discussion des résultats

IV.6.1 Détermination et vérification du modèle

Comme on a mentionné ci-dessus, l'objectif principal de cette étude est de déterminer un modèle mathématique donnant la relation entre la grandeur d'intérêt (réponse) qui est la rugosité de surface en fonction des quatre paramètres d'entrées du régime de galetage à savoir : force de galetage, vitesse de rotation, avance et nombre de passes de l'outil de galetage, basé sur une étude statistique par l'application d'un plan factoriel complet 2^4 . L'ordre des expériences menées ainsi que les résultats obtenus sont organisés suivant la matrice d'expérience indiquée dans le tableau IV.6. A noter ici que chaque paramètre du régime de galetage possède deux niveaux de variation (les valeurs au centre contribuent dans le traçage des courbes ayant un niveau 0).

N° : D'essai	Facteurs d'entrées					Facteurs de sorties
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Rugosité Ra [μm]
1	+1	-1	-1	-1	-1	1,81
2	+1	+1	-1	-1	-1	1,88
3	+1	-1	+1	-1	-1	1,19
4	+1	+1	+1	-1	-1	1,20
5	+1	-1	-1	+1	-1	1,39
6	+1	+1	-1	+1	-1	1,44
7	+1	-1	+1	+1	-1	0,84
8	+1	+1	+1	+1	-1	0,94
9	+1	-1	-1	-1	+1	1,54
10	+1	+1	-1	-1	+1	1,45
11	+1	-1	+1	-1	+1	1,17
12	+1	+1	+1	-1	+1	1,55
13	+1	-1	-1	+1	+1	1,55
14	+1	+1	-1	+1	+1	1,55
15	+1	-1	+1	+1	+1	1,43
16	+1	+1	+1	+1	+1	1,56
Niveaux	Profondeur X ₁ [mm]	Nr de passes X ₂	Vitesse X ₃ [tr/min]	Avance X ₄ [mm/tr]		
Niveau (-)	0,4	1	200	0,05		
Niveau (+)	0,8	3	800	0,15		

Tableau IV.6 : Matrice d'expériences et résultats.

Après une analyse de la variance « ANOVA » des résultats obtenus basée sur une étude statistique, les coefficients les plus significatifs du modèle mathématique prédit de la rugosité de surface en fonction des quatre paramètres du régime de galetage vérifié par le critère de t-Studenttest (Tab.IV.7) est le suivant :

Coefficients	Rugosité de surface Ra			
	valeur	E-type	t - Student	p-value
a₀	1,40562*	0,02319	60,61	<0,0001
a₁	0,04062	0,02319	1,75	0,14
a₂	-0,17062*	0,02319	-7,36	0,001
a₃	-0,06812*	0,02319	-2,94	0,032
a₄	0,06938*	0,02319	2,99	0,03
a₁₂	0,03688	0,02319	1,59	0,173
a₁₃	-0,00562	0,02319	-0,24	0,818
a₁₄	0,01188	0,02319	0,51	0,63
a₂₃	0,02562	0,02319	1,1	0,32
a₂₄	0,12313*	0,02319	5,31	0,003
a₃₄	0,11563*	0,02319	4,99	0,004
Valeur standard de t de Student test : $t_{0,05-5} = 2,015$.				
* Coefficient significatif.				

Tableau IV.7 Coefficients a_i des modèles et leurs significations.

A partir des résultats du tableau IV.7, le modèle final de la rugosité de surface en fonction des quatre paramètres du régime de galetage est comme suit :

$$R_a = 1,4056 - 0,1706x_2 - 0,0681x_3 + 0,0694x_4 + 0,1231x_{24} + 0,1156x_{34} \quad (\text{IV. 14})$$

Le modèle mathématique final est aussi testé par l'analyse de la variance « ANOVA » c'est-à-dire par le critère de Fisher (Tab.IV.8). Il s'est avéré que le modèle final de la rugosité de surface en fonction des quatre paramètres du régime de galetage est adéquat et possède un coefficient de détermination $R^2 = 91.13 \%$.

Réponses	Source des variations	Somme des carrés	Degrés de liberté dll	Carré moyen	Fisher
Rugosité de surface Ra	Facteurs principaux	0,61707	3	0,20569	19,69
	Interactions	0,45646	2	0,228231	21,85
	Résidus	0,10446	10	0,010446	
	Total	1,17799	15 (N-1)		

La valeur standard du rapport de Fisher pour le niveau significatif $\alpha = 0,05$ et degrés de liberté 3 et 10 est $F_{0,05(3, 22)} = 3,71$ et à un degrés de liberté 2 et 10 est $F_{0,05(2, 10)} = 4,10$.

Tableau IV.8 Test de Fisher pour la rugosité de surface.

IV.6.2 Analyse du modèle

L'analyse de l'équation finale du modèles de la rugosité de surface a permis de dégager les paramètres du régime de galetage les plus significatifs et l'influence de leurs interactions sur la réponse de sortie. Il est à remarquer que la rugosité prédite (Eq. IV.14) est fortement influencée par le nombre de passes de l'outil, l'avance ainsi que la vitesse de rotation de la pièce. La rugosité augmente inversement proportionnelle avec le nombre de passes de l'outil et la vitesse de rotation de la pièce par contre elle augmente proportionnellement avec l'avance de galetage. Ces trois facteurs représentent les paramètres les plus significatifs du galetage.

Le même modèle de prédiction montre bien que les interactions du nombre de passes de l'outil de galetage avec l'avance (i-f) ainsi que la vitesse de rotation avec l'avance (N-f) peuvent influencer l'évolution de la rugosité de la surface du matériau traité.

Afin d'étudier l'effet de chaque paramètre du régime de galetage sur la rugosité de surface, des courbes ont été tracées, indiquant ainsi l'effet de chaque paramètre du régime de galetage sur la rugosité de surface tout en gardant les autres paramètres à leurs valeurs moyenne qui correspond au niveau « 0 » (Tab.IV.9).

Paramètres	Codes	Niveaux		
		-1	0	1
Profondeur [mm]	X ₁	0,4	0,6	0,8
Nombre de passes P	X ₂	1	2	3
Vitesse de rotation N [tr/min]	X ₃	200	500	800
Avance f [mm/tr]	X ₄	0,05	0,1	0,15

Tableau IV.9 Valeurs et niveaux de variation des paramètres du galetage.

IV.6.3 Effet de la profondeur sur la rugosité de surface

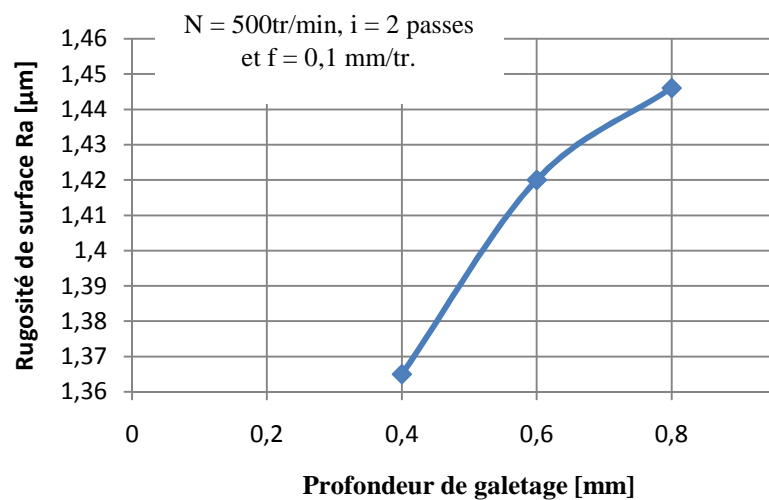


Figure IV.8 Effet de la profondeur de galetage sur la rugosité de surface.

La Figure IV.8 illustre l'effet de la profondeur de galetage sur la rugosité de surface, la courbe montre que pour des faibles valeurs de la profondeur de galetage la rugosité de surface est faible, mais lorsque la profondeur augmente en plus la rugosité de surface augmente graduellement, bien que l'augmentation dans la profondeur favorise une bonne pénétration de l'outil dans la surface traitée ainsi qu'un bon écrasement des aspérités de cette dernière. Cela peut être expliqué que les profondeurs de galetage élevées produisent le phénomène d'écaillage au niveau de la surface qui a comme conséquence la dégradation de l'état de surface ainsi que la rugosité qui est dû à la capacité du matériau à l'écrasement lorsque la profondeur de galetage est élevée.

IV.6.4 Effet du nombre de passes de l'outil sur la rugosité de surface

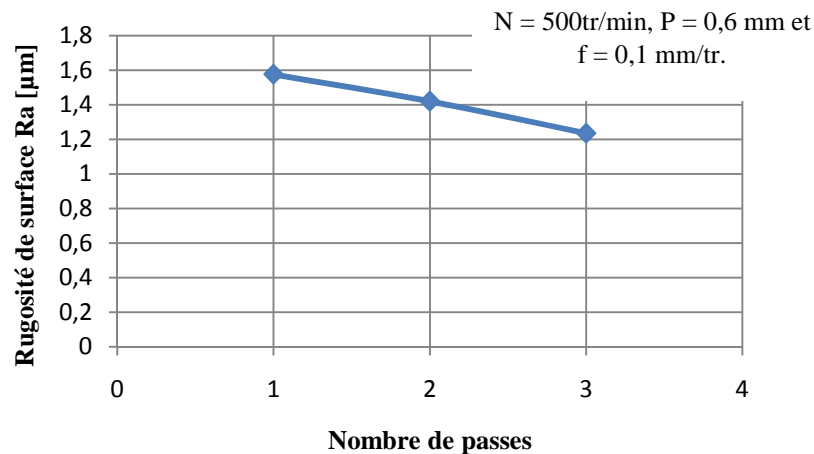


Figure IV.9 Effet du nombre de passes de l'outil sur la rugosité de surface.

La Figure IV.9 montre l'effet du nombre de passes de l'outil de galetage sur la rugosité de surface, à un faible nombre de passes la rugosité de surface est élevée, par contre au fur et à mesure que le nombre de passes de l'outil augmente la rugosité de surface diminue graduellement. L'action du passage de l'outil plusieurs fois sur la même surface traitée à plus de chance d'écraser les aspérités et reliefs laissés par le procédé antérieur (tournage). Ce qui engendre une amélioration considérable dans la rugosité de surface traitée.

IV.6.5 Effet de la vitesse de rotation sur la rugosité de surface

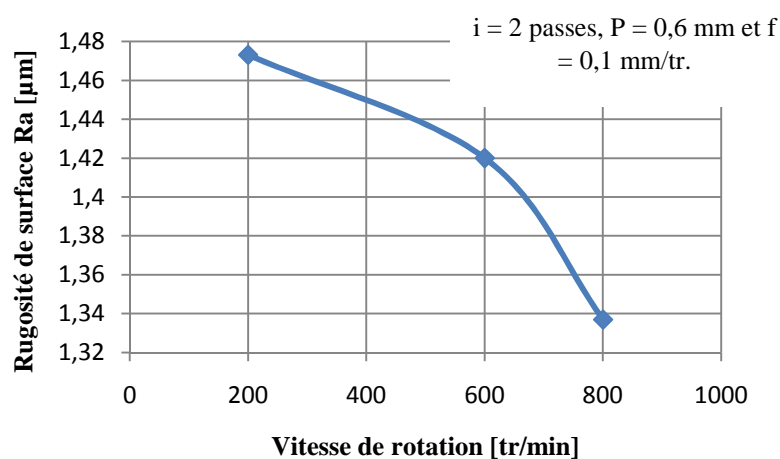


Figure IV.10 Effet de la vitesse de rotation sur la rugosité de surface.

L'influence de la vitesse de rotation de galetage sur la rugosité de surface est illustrée sur la fig.IV.10, la rugosité diminue graduellement avec l'augmentation de la vitesse de rotation. Cela peut être expliqué par le faible contact entre la surface traitée ainsi que la surface de l'outil dû aux faibles vitesses de galetage causant ainsi une mauvaise stabilité entre la surface du galet et la surface traitée phénomène de broutement. De bonnes rugosités de surface sont obtenues lorsque les vitesses de rotation de l'outil sont élevées, un bon contact de la surface traitée et celle du galet permis un écrasement en plus des aspérités de surface ce qui oblige les crêtes de cette surface de se fluer en plus dans les creux de cette dernière. Cette action mène à une amélioration de la finition de la surface traitée.

IV.6.6 Effet de l'avance de galetage sur la rugosité de surface

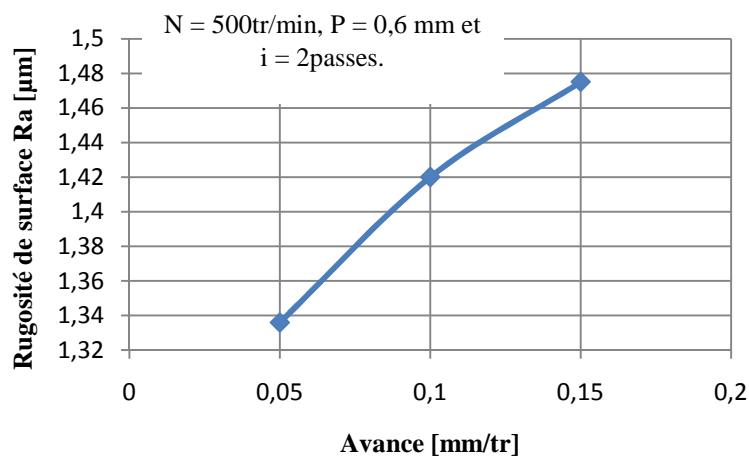


Figure IV.11 Effet de l'avance de galetage sur la rugosité de surface.

Comme est indiqué sur la Fig.IV.11, l'avance de galetage cause une augmentation dans la rugosité de surface quand elle est élevée. La meilleure rugosité est enregistrée avec les faibles avances de galetage car la distance entre les deux traces successives de l'outil de galetage est faible et permet à l'outil d'écraser en plus les aspérités de surface laissées par le procédé antérieur (tournage). Par contre lorsque l'avance de galetage est élevée la distance entre deux traces de l'outil de galetage est importante et beaucoup d'aspérités de surface laissées par le procédé antérieur (tournage) sont loupées par l'outil de galetage, qui résulte moins d'amélioration dans la finition de la surface traitée.

Les principales interactions ont été mises en évidence à partir d'une résolution graphique du modèle de prédiction de la réponse de sortie. Les courbes ont été tracées au moyen du logiciel Design-expert10 et montrent l'influence simultanée de deux principaux paramètres de galetage alors que les deux autres paramètres ont été fixés à leurs niveaux moyens « 0 ».

IV.6.7 Effet de l'interaction du nombre de passes et l'avance de galetage sur la rugosité

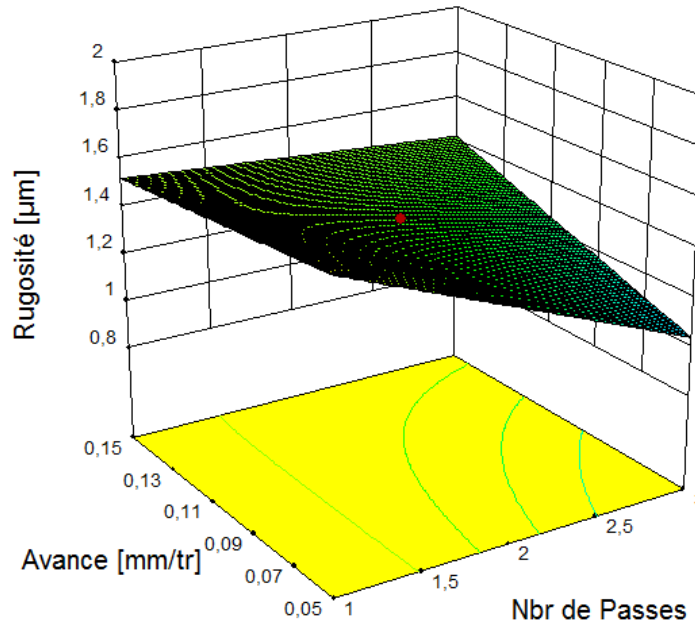


Figure IV.12 Effet de l'interaction du nombre de passes de l'outil et l'avance de galetage sur la rugosité de surface.

D'après la fig.IV.12 qui illustre l'effet de l'interaction du nombre de passes de l'outil et l'avance de galetage sur la rugosité de surface que cette dernière diminue considérablement avec une faible avance de galetage lorsque le nombre de passes est augmenté graduellement de 1 jusqu'à 3 passes car la distance entre les deux traces successives de l'outil de galetage est pour une faible avance de galetage est petite et permet à l'outil d'écraser en plus les aspérités de surface laissées par le procédé antérieur (tournage) et pour un nombre de passes élevé la rugosité diminue en plus car nombre de passes de l'outil élevé L'action du passage de l'outil plusieurs fois pour un nombre de passes élevé sur la même surface traitée à plus de chance d'écraser les aspérités et reliefs laissés par le procédé antérieur (tournage). Par contre pour une avance de galetage élevée et pour le même nombre de passes de l'outil la rugosité de surface diminue mais avec une faible tendance par rapport à une faible avance. La meilleure valeur de la rugosité est obtenue pour une avance de galetage de 0,05 mm/tr et un nombre de passes de l'outil de 3 passes.

IV.6.8 Effet de l'interaction de la vitesse de rotation et l'avance de galetage sur la rugosité

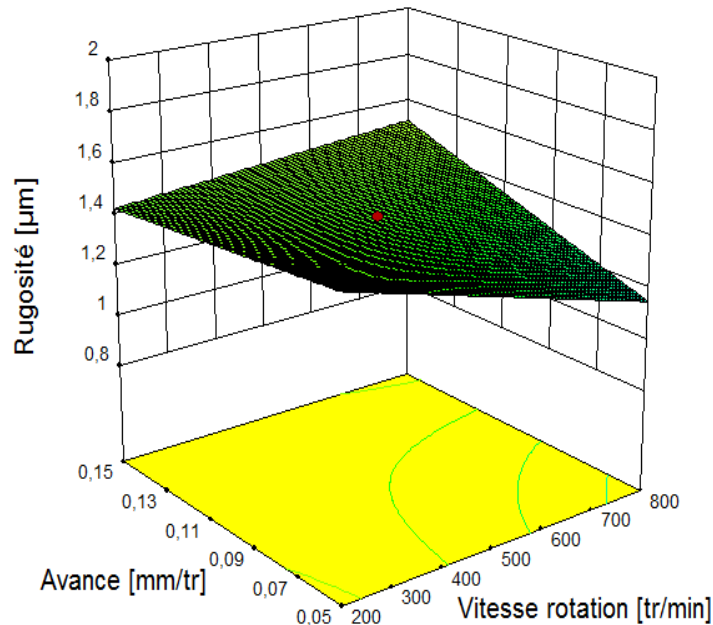


Figure IV.13 Effet de l'interaction de la vitesse de rotation et l'avance de galetage sur la rugosité.

La figure IV.13 illustre l'effet de l'interaction de la vitesse de rotation et l'avance de galetage sur la rugosité de surface, pour une faible avance de galetage et une vitesse de rotation qui augmente graduellement la rugosité de surface diminue considérablement, car en plus de l'avantage d'une faible avance de galetage sur la rugosité les vitesses de rotation élevées favorise un bon contact de la surface traitée et celle du galet permis un écrasement en plus des aspérités de surface ce qui oblige les crêtes de cette surface de se fluer en plus dans les creux de cette dernière. Cette action mène à une amélioration de la finition de la surface traitée. Par contre pour une vitesse de rotation élevée et une variation de l'avance de galetage en ordre croissant la rugosité de surface se dégrade graduellement car lorsque l'avance de galetage est élevée la distance entre deux traces de l'outil de galetage est importante et beaucoup d'aspérités de surface laissées par le procédé antérieur (tournage) sont loupées par l'outil de galetage. La meilleure valeur de la rugosité est obtenue pour une avance de galetage de 0,05 mm/tr et une vitesse de rotation de 800 tr/min.

IV.7 Conclusion

Les plans d'expériences offrent un moyen simple et efficace de réduire le coût et d'augmenter la robustesse des études expérimentales effectuées lors de la conception ou de la validation d'un produit industriel. Ils permettent d'utiliser toute la connaissance du produit dont le concepteur peut disposer a priori, offrent un cadre de modélisation rigoureux, et leur mise en œuvre ne nécessite que des connaissances mathématiques élémentaires. Cette ressource n'offre naturellement qu'un aperçu des possibilités de cette méthode ; nous donnons pour cette raison un certain nombre de références, permettant au lecteur d'approfondir ou de découvrir d'autres points de vue sur le sujet. Le plan d'expériences mis en place ici a permis d'identifier les conditions d'usinage conduisant à une rugosité minimale.

CHAPITRE V :
Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nos efforts ont été concentrés sur l'étude, la conception, la réalisation surtout de la partie active qui est considéré comme la partie clé de notre travail ainsi que la partie de validation de l'outil par des essais et tests sur échantillons en acier afin d'éclaircir certaines questions se rapportant au phénomène de la déformation plastique superficielle, et ce qu'elle engendre comme effets sur le comportement des pièces en service dans les structures mécaniques. Notre étude a été orientée sur un des procédés qui traite mécaniquement les surfaces des pièces mécaniques par déformation plastique superficielles et qui est qualifié comme un procédé d'usinage de finition. Le galetage à bille permet de répondre à certaines exigences techniques imposées lors de la fabrication et la conception des pièces mécaniques. Néanmoins, l'influence de la déformation plastique qui dépend des propriétés du matériau, de la valeur de la contrainte appliquée et de plusieurs paramètres mis en jeu. Les expériences menées dans cette étude ont montré que le matériau considéré répond convenablement à la déformation plastique mise en jeu par la modification des propriétés géométriques et mécaniques de leurs couches superficielles affectant un paramètre très important qui est la rugosité de surface.

D'autre part, la validation de l'outil conçu a été réalisé par la détermination d'un modèle mathématique liant les quatre paramètres du régime de galetage à bille et la rugosité de surface « Ra » en utilisant la méthode des plans d'expérience basée sur une étude statistique, des résultats intéressants ont été obtenus concernant la diminution de la rugosité de surface avec le temps et le coût le plus faible d'où l'intérêt technique et économique du procédé de galetage.

Après avoir établis un cahier des charges, une conception a été initiée sous environnement SolidWorks, un certain nombre de calculs sont fait afin de dimensionner les différentes pièces et mécanismes composant cet outil. Après validation de la conception l'étape suivante était la réalisation.

En fin, on peut dire que les résultats obtenus dans le cadre de cette travail ont permis de mieux comprendre et apprécier les phénomènes physiques mis en jeu lors du traitement mécanique des surfaces de acier et les effets bénéfiques qu'il permet d'engendrer. Ceci permet d'apporter de nouvelles réflexions sur l'intégration de cette technique et son développement dans le secteur industriel nationale.

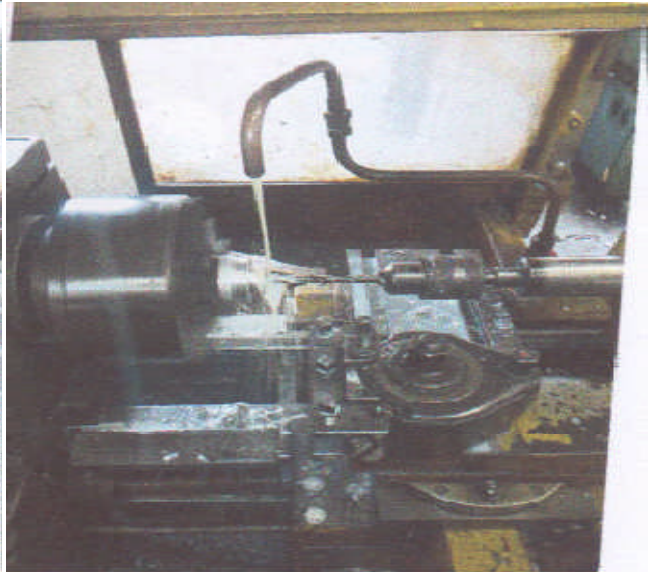
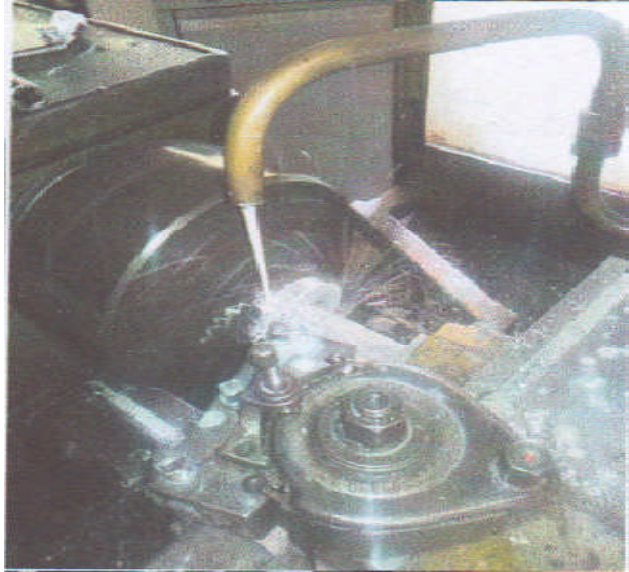
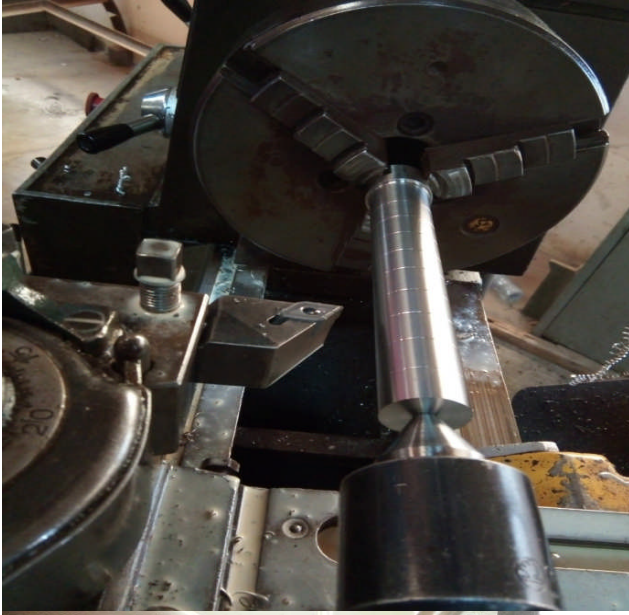
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

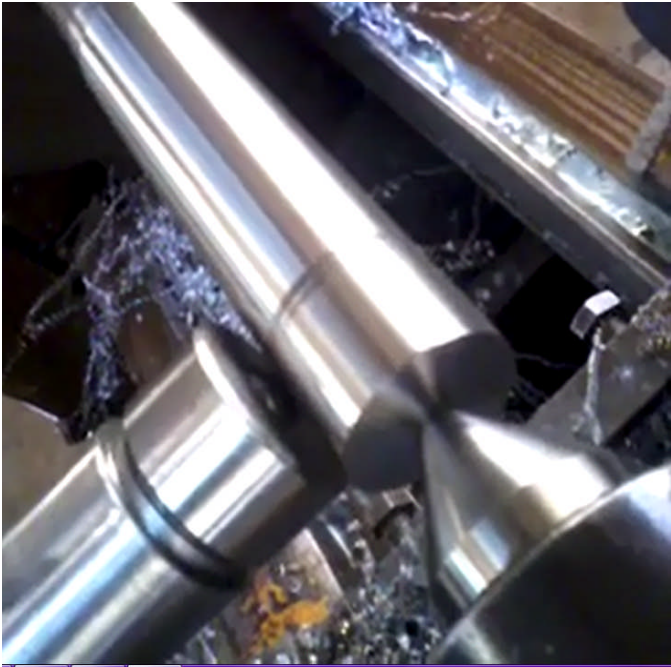
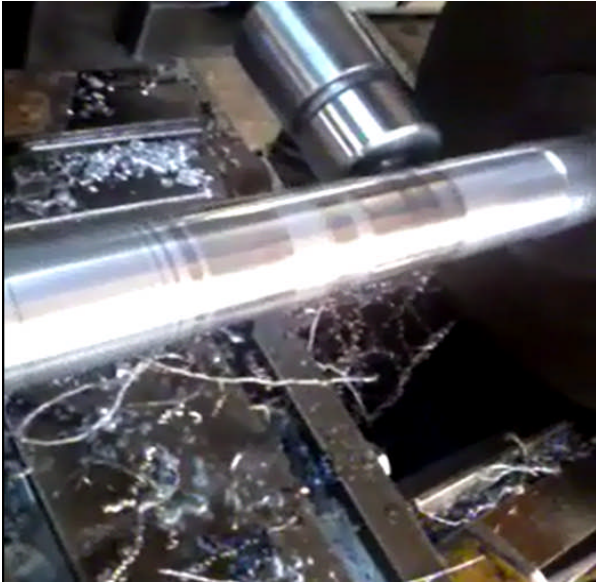
- [1] G. LEMASSON, L. BLAIN, Matériaux de construction mécanique et électrique, Dunod 1976.
- [2] L.SEDOV, mécanique des milieux continus, IZDATELVSTVO « Hayka » 1973, Traduction.
- [3] L. KATCHANOV, Éléments de la théorie de la plasticité, traduction française, éditions Mir 1975.
- [4] G. FRADE ; Métallographie essais mécaniques ; 1970.
- [5] J-P Baillon, J-M Dorlot, DES MATERIAUX, Presses Internationales polytechnique, École polytechnique de Montréal, 2000.
- [6] KAPSA et CARTIEN, techniques de l'ingénieur- traité mécanique, 1986
- [7] C. BATHIAS, J. P. BAILON, La fatigue du matériau et des structures pour les presses de l'université de Montréal, Edition MALOINE, Paris 1980.
- [8] ALEXANDRE N. OVCEYENKO, MAKSIMILIAN. M. GAJEK, VLADIMIR I. CEREBRYAKOV, Formation de l'état de surface des pièces par procédés technologiques, Politecnika OPOLOSKA, NAKLAD, Opole.2001.
- [9] ALAIN LOST, REGIS BIGOT et LAURENT BORDEAU. L'essai de dureté Vickers : application et influence de la charge. Revue « matériaux et techniques » (1995).
- [10] ERCHOV. A. A. SERGUEEV. U. A. KHMELNIKIR. V. L., L'efficacité et perspectives d'utilisation de l'usinage fini, augmentation de la résistance à l'usure de la construction des machines dans l'industrie de l'énergie M. NIIE-INFORMATION- ENERGOMAC1986, 34 p.
- [11] ALAIN LOST, REGIS BIGOT et LAURENT BORDEAU. L'essai de dureté Vickers : application et influence de la charge. Revue « matériaux et techniques » (1995).
- [12] L.CATEX, Les traitements de surface et la durée de vie, mécanique matériaux électricité, Revue du GAMI N° 440, Septembre 1991
- [13] M. LEMERCIER, Le galetage fin de surface, 42ème conférence du CT.DEC, Bulletin d'information N°41 du centre Technique de l'industrie de décolletage, Octobre 1976.
- [14] A.BENAMAR, G GRIDINE, Amélioration de la qualité de l'état de surface par le Galetage,
- [15] M. LEMERCIER. Emploi rationnel du galetage fin des surfaces, techniques industrielles N° 92, P.P 69-79 février (1978).
- [16] F. KLOCKE. J. LIERMANN. Roller burnishing of hard turned surfaces, international journal of machines tools et manufacture vol 38 P.P 419-423 (1998).

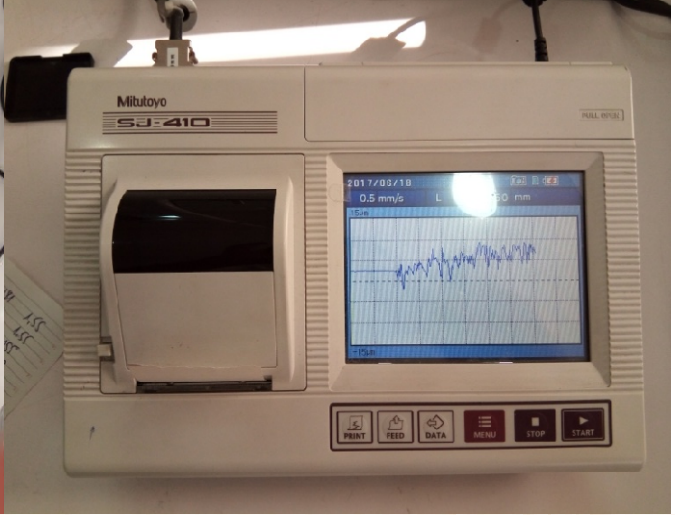
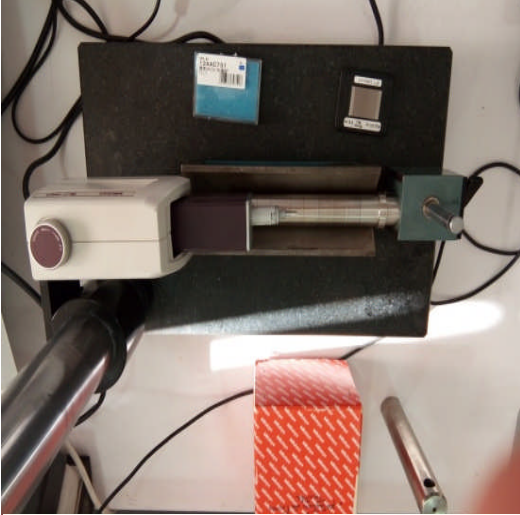
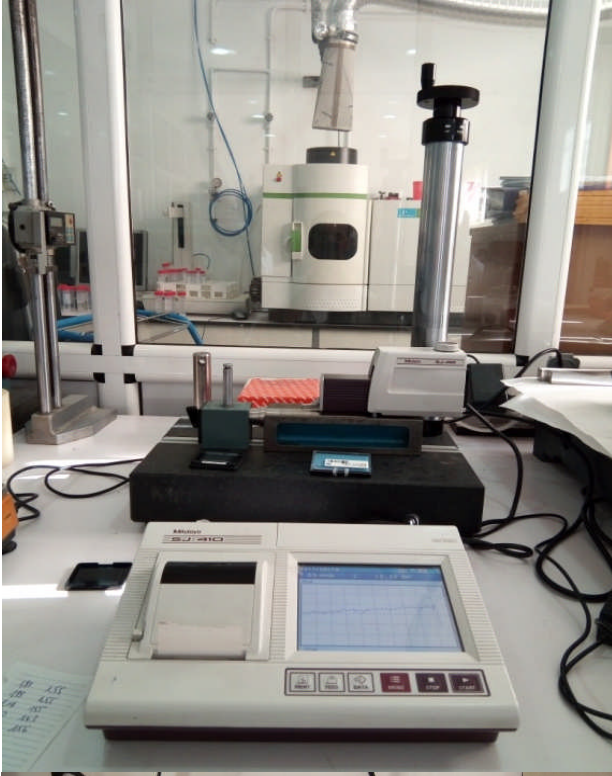
- [17] A.C.E MENDAR. La technique du galetage, métaux et déformation N° 47 N.P 45-56 mars/avril (1978).
- [18] M.H. EL-AXIR. An investigation into roller burnishing, international journal of machine tools et manufacture vol 40 P.P 1705-1719 (2000).
- [19] M.TOURAB, Influence des paramètres du régime de galetage sur les fonctions finales de rugosités et de dureté de surface des aciers, thèse de magister 2003, Département de Mécanique, Faculté des sciences de l'ingénieur ; Université Badji Mokhtar.
- [20] F. KLOCKE. J. LIERMANN. Roller burnishing of hard turned surfaces, international journal of machines tools et manufacture vol 38 P.P 419-423 (1998).
- [21] A.C.E MENDAR. La technique du galetage, métaux et déformation N° 47 N.P 45-56 avril (1978).
- [22] HEXAGON Software .catalogue de ressort à compression, Berlin ; 2017
- [23] R, ITTERBEEK, résistance des matériaux –solllicitations composées, avril 2014
- [24] DEPERY DUFOUR, fiche technique de produit, 2017
- [25]A. CHEVALIER, J. BOHAN, Guide au technicien en fabrication mécanique, Hachette Technique, Paris, 2004
- [26] SEINTURIER Francine, guide d'assemblage par boulon IUT Génie civil de Grenoble ,2017
- [27] Y.G. SCHNEIDER, Technologie de traitement de finition sous pression, Guide de mémoire,
- [28] R.BASQUIN, insepcteur générale de l'enseignement technique, RDM ; 1983
- [29] M .HECHEMANE, Cour de construction mécanique, F.S.I boumerdes, 2016
- [30] J. Goupy. Pratiquer les plans d'expériences, Ed. Dunod, Paris, 1999.
- [31] J. Goupy. Modélisation par les plans d'expériences » Technique de l'ingénieur R275.
- [32] G. Sado, M. C. Sado. Les plans d'expériences de l'expérimentation à l'assurance qualité. Ed. Afnor Technique, 1991.
- [33] S. Braham, Modélisation du galetage des Vilebrequins. Évolution des contraintes résiduelles sous chargement cyclique, Thèse de Doctorat, Palaiseau, Octobre 1991.
- [34] H.HAMADACHE, L.LAOUAR, K.CHAOUI, Behavior of the superficial layers of steel RB40 under the effect of the ball and roller burnishing, Second Symposium on Heat Treatment of Metals & Alloys, 4-6 Dec. 2004, CAIRO EGYPT
- [35] J. Goupy. Introduction aux plans d'expériences. 2^{ème} Ed. Dunod, Paris, 2001.
- [36] MITUTOYO .Appareil de mesure des états de surface SJ-410 .JAPAN, édition2016

Annexes

- *Les photos de la partie pratique d'usinage et l'opération de galetage*
- *Les calculs mathématique de matrice des essais et réponses*







Mitutoyo SURFTTEST
SJ-410
 Date 2017/05/17
 Heure 08:31:45

A Eval. Cond.

Norme ISO1997
 Profil R
 Filtre GAUSS
 λc 2.5mm
 λg 8μm
 N 5
 Pre/Post OFF
 Sup. Ondu. OFF
 Jugement Tol Moyen.
 Prof. Comp OFF
 Moyenne OFF

Calc. Result

Ra	0.940	μm
Rz	6.337	μm
Rt	8.782	μm

$\mathbf{X}^T =$

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1
-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1

$\mathbf{X}^T\mathbf{Y} =$

$\mathbf{Y} =$

22.4900

1.81

0.6500

1.88

-2.7300

1.19

-1.0900

1.20

1.1100

1.39

0.5900

1.44

-0.0900

0.84

0.1900

0.94

0.4100

1.54

1.9700

1.45

1.8500

1.17

-0.2300

1.55

0.6100

1.55

-0.2300

1.55

-0.0900

1.43

-0.4500

1.56

$$\mathbf{B} = [\mathbf{X}^T \mathbf{X}]^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} = (\text{inv}(\mathbf{X}' * \mathbf{X})) * \mathbf{X}' * \mathbf{Y}$$

1.4056

0.0406

-0.1706

-0.0681

0.0694

0.0369

-0.0056

0.0119

0.0256

0.1231

0.1156

-0.0144

0.0381

-0.0144

-0.0056

-0.0281