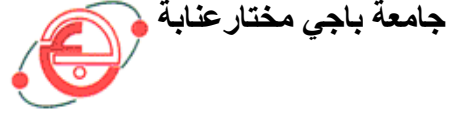


وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

Etude de la gamme d'usinage d'un support d'enrouleuse de tôles
et étude de l'effet des paramètres de fraisage sur la rugosité

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : PRODUCTIQUE MECANIQUE

PRESENTE PAR : AOUASSA IZZEDDINE

DIRECTEUR DU MEMOIRE : M. BENGHERSALLAH

DEVANT LE JURY

PRÉSIDENT: PROF. A.M BOUGHELAGHEM

EXAMINATEURS: PROF. H. HAMADACHE
MCA A. BOURENANE

Année: 2013/2014

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions le Dieu, notre créateur de nos avoir donné les forces pour accomplir ce travail.

Premièrement et avant tout, nous adressons le grand remerciement à notre encadreur Mr : **M. BENGHERSALLAH** pour ses conseils et ses directives.

Nous voulons également remercier tous nos enseignants et les étudiants de notre promotion et nous leur souhaitons le bon courage a tous pour finir les études.

Nous voulons également remercier tout ce qui ont participe à la réalisation de ce mémoire à commencer par nos parents.

DEDICACE

Enfin, nous avons le grand honneur de dédier ce modeste travail à :

Nos très chers parents

Toute la famille

A tous nos amis

A tous nos camarades des groupes

A tous les amis d'études

A tous les enseignants et toutes les enseignantes qui ont contribué

A nos formations tout au long de nos vies d'étude

A tous ceux que nous aimons et qui nous aiment

Sommaire

Introduction	1
---------------------------	---

CHAPITRE I

Le fraisage

I.1. Définition.....	2
I.2. Différents types de fraiseuses.....	2
I.3. La fraiseuse Universelle.....	4
I.4 .Les fraises.....	5
I.5. Les principes généraux de fraisage	11
I.6. Les éléments de coupe.....	13
I.7. L'ablocage des pièces.....	14
I.8. L'appareil diviseur.....	16
I.9. Graissage.....	17

CHAPITRE II

Les conditions de coupes

II. 1.Rappels	18
II .1.1.Les paramètres de coupe :.....	18
II .1.2.Les formules de coupe :.....	18
II .2. Le fraisage	19
II .2.1.Choix de l'avance : (en mm/dent)	19
II .2.2 Profondeur de passe : (en mm)	19
II .2.3Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes (en m/min).....	20

II .3.Le perçage.....	21
II .3.1.Choix de l'avance : (en mm/tr)	21
II .3.2.Profondeur de perçage : (en mm)	21
II .3.3.Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes	21
II .4.Le taraudage.....	22
II .4.1.Choix de l'avance : (en mm/tr)	22
II .4.2.Diamètre perçage avant taraudage : (en mm)	22
II .4.3.Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes (en m/min)	22
II .5.L'alésage.....	23
II .5.1.Diamètre ébauche avant alésage :.....	23
II .5.2.Choix de l'avance : (en mm/tr).....	23
II .5.3.Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes (en m/min)	23
II .6.PROBLEMES & SOLUTIONS.....	24

CHAPITRE III

La rugosité

1 La rugosité.....	25
1. Définition.....	25
2. Principaux paramètres de la rugosité.....	25
2.1. Paramètres liés aux motifs et à la ligne enveloppe.....	26
2.2. Paramètres liés à la ligne moyenne.....	27

2.3 Paramètres liés à la distribution d'amplitude.....	29
3 .Mesure de la rugosité.....	30
4 .Analyse de la surface.....	31
5. Les paramètres de la rugosité.....	32
6. Inscription normalisée d'un état de surface.....	33
7 . Fonctions et états de surface.....	34
8. Procédés d'élaboration et états de surface.....	34
9 . Procédés permettant une faible rugosité.....	35
9.1- Rodage	35
9.2- Superfinition	36
9.3- Galetage	37
10. Évacuation de la rugosité	38
10.1- Plaquette d'échantillons viso-tactiles	38
10-2- Machine portable	38
Conclusion	39

CHAPITRE IV

Gamme d'usinage

CHAPITRE V

la partie initiation à la recherche

V.1.Introduction.....	58
V.2. Equipements utilisés pour les essais.....	58
V.3. PLAN D'EXPERIENCE.....	59
V.4. Résultats des essais de la rugosité.....	60
V.5 Traitement et Analyse des résultats.....	60
V.6. Conclusion	64
Conclusion générale	65
Références bibliographiques.....	66
Annexes1 : Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes..... (en m/min).....	67
Annexes2: Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes (en m/min)	68
Annexes3: Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes	69
Annexes4: Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes	70
(en m/min)	70
Annexes 5 : Procédés de fabrication et rugosité de surfaces réalisées.....	71

Liste des figures :

Figure I.1 la fraiseuse universelle	4
Figure I.2 La forme géométrique des taillants d'une fraise].....	5
Figure I.3 Caractéristiques des fraises.....	5
Figure I.4 Paramètres liés à la distribution d'amplitude	6
Figure I.5 Les outils en ARS.....	9
Figure I.6 plaquette amovible en carbure.....	10
Figure I.7 différentes possibilités font apparaître	11
Figure I.8 Plateau circulaire.....	15
Figure I.9 Plateau diviseurs.....	16
Figure I.10 Les méthodes de division.....	17
Figure III.1 Paramètres liés aux motifs	26
Figure III. 2 Paramètres d'ondulation	26
Figure III. 3 Paramètres liés à la longueur de base	27
Figure III. 4 Paramètres liés à la longueur d'évaluation	28
Figure III.5 Paramètres liés à la distribution d'amplitude	29
Figure III.6 Analyse de la surface.....	31
Figure III.7 Les paramètres de la rugosité.....	32
Figure III.8- Inscription normalisée d'un état de surface.....	33
Figure III.9 Rodage	35
Figure III.10 Galetage	37
Figure V. 1 :. Outil employé	58
Figure V.2. Fraiseuse avec pièce sur étau.....	58

Figure V.3 Rugosimètre modèle M SJ 300	59
Figure V.4 : Pièce à usiner (épreuve).....	59
Figure V.5 : influence de la profondeur de passe sur les rugosité (Ra) en fonctions du Fz avec Vc =60.....	61
Figure V.6 : influence de la profondeur de passe sur les rugosité (Ra) en fonctions du Fz avec Vc =100.....	61
Figure V.7 : influence de la profondeur de passe sur les rugosité (Ra) en Fonctions du Fz avec Vc =140.....	61
Figure V.8 : influence de la profondeur de passe sur les rugosité (Rt) en fonctions du Fz avec Vc =60.....	62
Figure V.9: influence de la profondeur de passe sur les rugosité (Rt) en fonctions du Fz avec Vc =100.....	62
Figure V.10 : influence de la profondeur de passe sur les rugosité (Rt) en fonctions du Fz avec Vc =140.....	62
Figure V.11 : influence de la profondeur de passe sur les rugosité (Rz) en fonctions du Fz avec Vc =60.....	63
Figure V.12 : influence de la profondeur de passe sur les rugosité (Rz) en fonctions du Fz avec Vc =100.....	63
figure V.13 : influence de la profondeur de passe sur les rugosité (Rz) en fonctions du Fz avec Vc =140.....	63

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1. Vitesses de rotation de la fraiseuse 6H11.....	58
Tableau 2. Avances.....	58
Tableau 1 : Plan 27 essais	59
Tableau 2 : Résultats des essais	59
Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes (en m/min)	67
Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes	68
Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes (en m/min)	69
Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes (en m/min).....	71
Procédés de fabrication et rugosité de surfaces réalisées.....	71

Conclusion générale :

Le caractère expérimental de notre étude nous a obligés de nous perfectionner dans le côté pratique de l'usinage. En effet nous étions contraints de bien apprendre la manipulation des machines-outils et d'acquérir une certaine technique d'instrumentation pour mener à bien les différents relevés des résultats expérimentaux.

Cette étude nous a aussi permis de passer en revue plusieurs modules et cours théoriques que nous avons étudiés au cours de notre cursus pédagogique.

L'étude expérimentale réalisée sur le suivi de l'évolution du phénomène de l'usure d'outil de coupe et particulièrement en fraisage, la variation de l'état de surface des éprouvettes testées nous a passionnées.

Nous souhaitons que ce modeste travail va contribuer à l'enrichissement de la recherche dans le domaine de la coupe des métaux et particulièrement par la mise en valeur d'une banque de données relative aux conditions optimales d'usinage. La contribution à l'établissement d'abaques de plus en plus précis et particulièrement pour l'établissement de programme de génération automatique des gammes d'usinage en productique mécanique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Kane Malal, contribution à l'étude de l'influence de la rugosité et des effets non newtoniens dans les contacts sévères lubrifiés, institue national des sciences appliquées de Lyon 20

2. Sandvik-Coromant, «Fraisage », Technique de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique, BM 7 082, 1997.

3. Éléments de dessin technique
(TN01 : Automne 2009)

4. Jacques Boulanger, Tolérences et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface, sous la direction Eric Felder, BM 74 technique de l'ingénieur janvier 2000.

5. wikipédia encyclopédie libre [http://fr.wikipedia.org/wiki/As % .état de surface](http://fr.wikipedia.org/wiki/As_%20%C3%A9tat_de_surface)
catégorie usinage.

6. Martin Benjamin, publié sur [http://www.iFrance.com/espace-prepa/www.technique-ingenieur.fr/.../Introduction aux traitements de surface par impact](http://www.iFrance.com/espace-prepa/www.technique-ingenieur.fr/.../Introduction_aux_traitements_de_surface_par_impact). référence M1640 publié décembre 2000.

7.All cut instruments, principe de la mesure, www.mesures.com [www.all-cut-biz](http://www.all-cut.biz).

8. Y. Schoefs, S. Fournier, J. C. Leon, « *Productique mécanique* », Delagrave, 1994, France.

9. CHEVALIER □ □ Technologie des fabrication mécanique □ (1976)

10. F. GRASS □ Manuel de Données technologiques d'usinage en fraisage □ *Centre Technique des Industries Mécanique* (1988)

Introduction générale :

L'usinage par enlèvement de matière consiste à réduire progressivement les dimensions de la pièce par enlèvement du métal à froid et sans déformation en utilisant un outil. La quantité de matière enlevée est dite copeaux et l'instrument avec lequel est enlevée la matière est appelé outil de coupe. L'opérateur utilise des machines dites machines-outils pour réaliser l'usinage d'une pièce.

A ce jour, l'usinage des matériaux occupe une place très importante dans la fabrication mécanique, ce domaine soumis à de fortes contraintes : économiques, écologiques et physiques etc. Les industriels ont besoin d'améliorer leurs processus de production pour l'augmentation de la productivité en termes de qualité ou quantité et réduisent les inconvénients de ces opérations.

Le fraisage est l'un des plus important procédé d'usinage, ses opérations forment une matière très riche de recherche à cause du besoin industriel croissant. La satisfaction de ce besoin ne sera réalisée qu'à l'aide d'un choix judicieux des paramètres de coupe. Le premier chapitre porte sur une étude bibliographique permet de rappeler les principales notions de base de fraisage et une étude théorique qui donné les formules des paramètres de coupe

Dans le deuxième chapitre, nous allons présentés les conditions de coupe relatives au différents procédés employés pour la réalisation de notre pièce.

Dans le troisième chapitre nous avons étudié la rugosité de la surface usinée par la mise en évidence des différents critères de mesure.

Dans le quatrième chapitre nous avons présenté la gamme d'usinage de la pièce "support d'enrouleuse"

Le cinquième chapitre est réservé à la partie initiation à la recherche et il concerne l'étude de l'influence des paramètres de coupe (V_c , f_z , a_p) sur la rugosité (R_a, R_t, R_z).

Enfin notre travail est clôturé par une conclusion qui met en évidence ce que nous avons obtenu comme résultats.

Le fraisage

1) Définition :

Le fraisage est un procédé d'usinage dont le rôle primordial est l'obtention de surfaces planes de forme concave ou convexe. L'outil employé pour effectuer ce travail est la fraise.





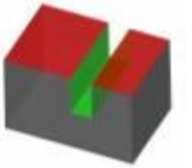

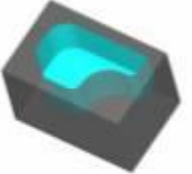

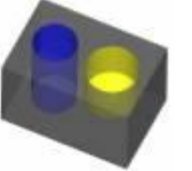

En tournant, la fraise enlève sur la pièce, des copeaux. L'enlèvement des copeaux s'effectue grâce à la combinaison du mouvement de rotation de la fraise et la mouvement d'avance de la table.

2) Différents types de fraiseuses

- Fraiseuse horizontale : la fraiseuse horizontale utilise des fraises montées sur un arbre porte-fraise horizontal.
- Fraiseuse horizontale transformable : la fraiseuse horizontale peut se transformer occasionnellement en fraiseuse verticale grâce à l'utilisation d'une tête verticale rapportée.
- Fraiseuse universelle : la broche ou arbre porte-fraise peut occuper toutes les inclinaisons possibles par rapport à la table porte-pièce de la machine.
- Fraiseuse vertical : la broche est perpendiculaire à la surface de la table. Il en existe de différents types :
 - à tête porte-broche fixe.
 - à tête porte-broche inclinable dans le plan vertical parallèle à l'axe de la table.

➤ Les opérations d'usinage

- **Le surfacage**
Réalisation d'une surface plane à l'aide de fraises de face ou de profil.
- **Le rainurage**
Consiste à réaliser une rainure à l'aide de fraises de profils adaptés au genre de rainures à exécuter.
- **Le détournage de profils**
C'est une opération qui consiste à finir le profil d'une pièce à l'aide d'une fraise généralement cylindrique à une taille.
- **Le profilage**
Lorsque les profils fraisés résultent directement de formes de la fraise et non des mouvements de la pièce.

Dessin	Opération	
	<p>Surfaçage Le surfaçage c'est l'usinage d'un plan par une fraise. (surface rouge)</p>	 <p>Fraise à surfacer</p>
	<p>Plans épaulés C'est l'association de 2 plans perpendiculaires (surfaces vertes)</p>	 <p>Fraise de tailles</p>
	<p>Rainure C'est l'association de 3 plans. Le fond est perpendiculaire au deux autres plans. (surfaces vertes)</p>	 <p>Fraise 2 tailles Fraise 3 tailles</p>
	<p>Poche La poche est délimitée par des surfaces verticales quelconque (cylindre et plan). C'est une forme creuse dans la pièce. (surface cyan)</p>	 <p>Fraise 2 tailles</p>
	<p>Perçage Ce sont des trous. Ils sont débouchant (surface bleu) ou borgnes (surface jaune).</p>	 <p>Foret Alésoir Fraise 2 tailles (pour le plastique)</p>

3) La fraiseuse Universelle

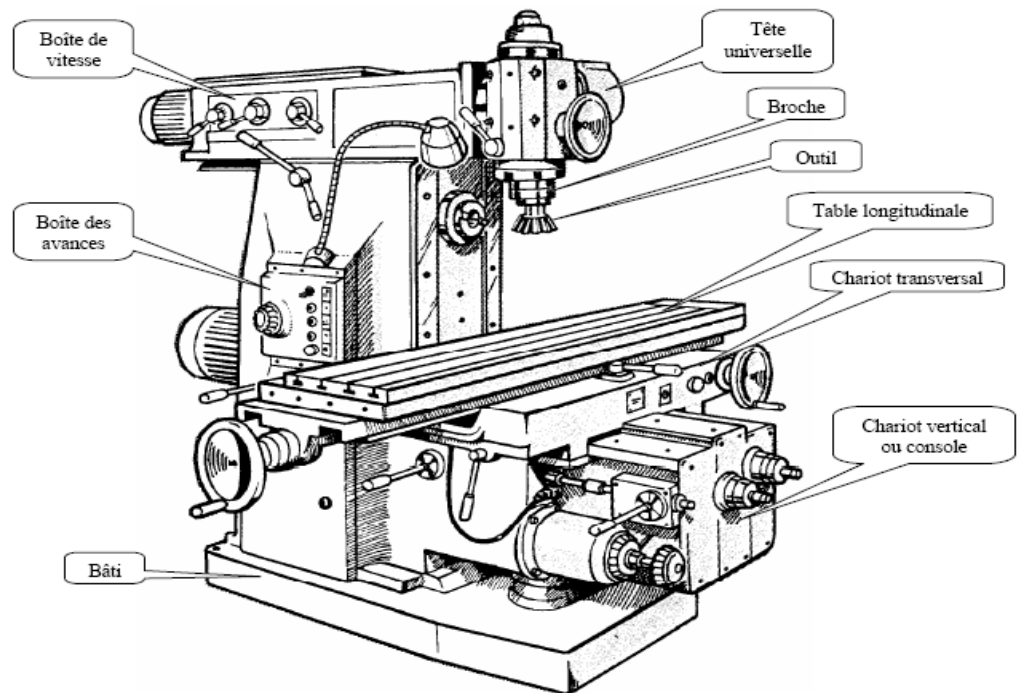


Figure I.1 la fraiseuse universelle

La fraiseuse se compose de :

1. Un bâti en fonte servant d'assise à la machine et supportant les différents organes.
2. Une poupée fixe analogue à celle d'un tout qui transmet le mouvement à la fraise.
3. L'arbre porte-fraise en acier spécial recevant son mouvement de la broche.
4. Le support horizontal ou poutre en fonte de longueur réglable suivant les montages de fraises et pièces.
5. Le support d'arbre : destiné à soutenir l'extrémité libre de l'arbre porte-fraises.
6. Une console reliée au bâti par ses glissières et portant les différents chariots porte-pièces.
7. Le chariot transversal coulisse sur les glissières transversales de la console.
8. La table rectangulaire se déplace longitudinalement sur les glissières du chariot transversal.
9. Le moteur électrique.
10. La boîte des vitesses.
11. La boîte des avances.

Les différents mouvements

- Mouvement de rotation de la fraise : obtenue par le MR de l'arbre porte-fraise .Cette rotation produite par un moteur électrique.
- Mouvement d'avance : ce mouvement peut être communiqué à la table.
 - Manuellement par la vis de la table actionnée par la fraiseuse qui agit sur la manivelle ou le volant.
 - Automatiquement par la vis de la table qui est commandée par la boîte des avances.

C'est l'avance par dent qui détermine l'épaisseur du copeau.

- Mouvement de pénétration : il est obtenu par le déplacement vertical de la console sur une fraiseuse horizontale ou par un déplacement latéral de la table sur une fraiseuse verticale c'est ce mouvement de positionnement qui permet de régler la profondeur de passe.

4) Les fraises

La fraise est un outil multiple, formé par plusieurs taillants disposés radialement sur une circonférence. La forme géométrique des taillants d'une fraise est soumise à trois angles fondamentaux sont :

- angle de dépouille, α (alpha)
- angle de coupe, γ (gamma)
- angle de matière, β (beta)

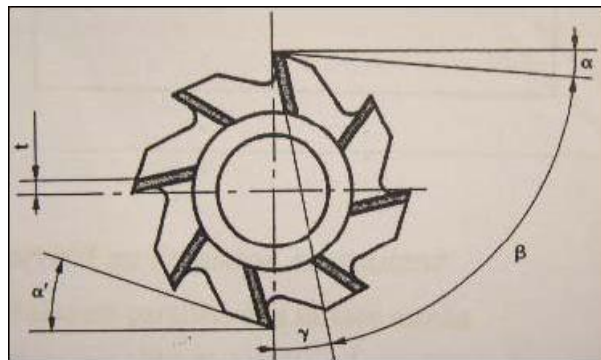
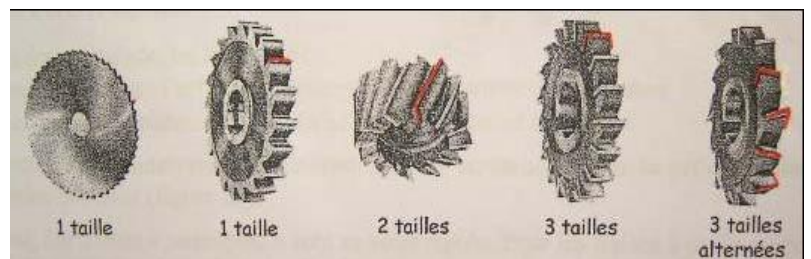


Figure I.2 La forme géométrique des taillants d'une fraise]

Caractéristiques des fraises

- La taille :
Correspondant nombre d'arêtes tranchantes par dents

- Fraises à une taille
- Frais à deux tailles
- Frais à trois tailles



- La forme :
 - Fraises cylindriques
 - Fraises coniques, biconiques
 - Fraise cloche
 - Fraises de forme
 - Fraises à lames ou à outils rapportés

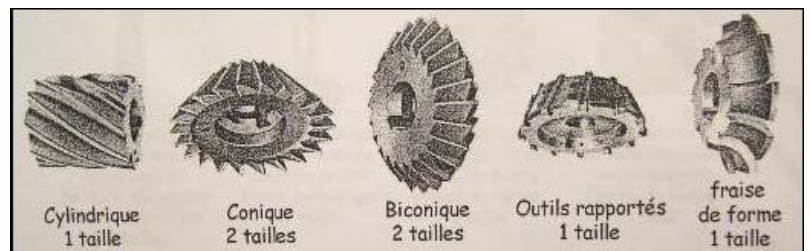


Figure I.3 Caractéristiques des fraises

➤ La denture :

- Si l'arête tranchante est parallèle à la de la fraise, on a :
 - une denture droite
- Si l'arête tranchante est inclinée par rapport à l'axe de la fraise, on a :
 - une denture hélicoïdale à droite ou à gauche
 - une denture à double hélice alternée

Une fraise est également caractérisée par son nombre de dents.

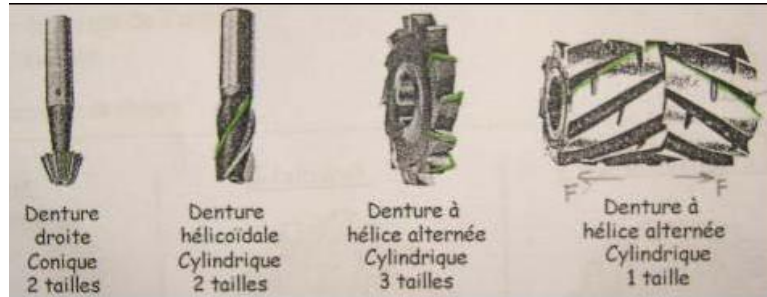


Figure I.4 Paramètres liés à la distribution d'amplitude

➤ Le mode de fixation :

On distingue deux modes de fixation distincts :

- à trou : lisse, lisse rainurer ou taraudé
- à queue : cylindrique ou conique

Classification des fraises

- **Fraises monoblocs** : Ce sont des fraises dont la denture est taillé dans la masse on rencontre 2 types de fraises monoblocs.
 - Fraise à denture taillé ou fraisée
 - Fraise à profil constant
- **Fraises à denture rapportée** : sont intéressantes du fait de la fabrication du corps de fraise en acier ordinaire au carbone et des dents en acier à coupe rapide ou alliage spécial.
Deux types se rencontrent souvent :
 - fraises à outils rapportés
 - fraises à plaquettes rapide
- **Fraises rouleaux** : c'est une fraise monobloc cylindrique à trou lisse pourvu d'une rainure pour clavette d'entraînement. Les fraises plus larges possèdent un alésage chambré qui assure un meilleur guidage fraise/arbre.

Montage de l'arbre porte-fraise et de la fraise

On veillera tout simplement :

- Nettoyer le cône intérieur de la broche.
- Placer l'arbre porte-fraise, l'orienter suivant les tenons d'entraînement.
- Huiler légèrement le filet de la tige de rappel qui fixera l'arbre porte-fraise dans son logement.
- Serrer l'écrou de blocage.
- Placer les bagues intercalaires.
- Situer la position de la fraise (porte-à-faux minimum).
- Placer la fraise (cale, sens de rotation).
- Placer les bagues intercalaires.
- Situer la position de la bague de roulement.
- Placer la bague guide.
- Positionner et bloquer la poutre.
- Placer le bras support.
- Fixer celui-ci sur la poutre.
- Placer les bagues intercalaires.
- Visser et bloquer l'écrou de blocage.

Démontage de la fraise et de l'arbre porte-fraise

- Débloquer et desserrer l'écrou de blocage.
- Enlever les bagues intercalaires.
- Débloquer le bras support.
- Enlever le bras support et la bague de roulement restée dans celui-ci.
- Enlever les bagues intercalaires.
- Enlever la fraise.
- Replacer les bagues intercalaires ainsi que l'écrou de blocage.
- Débloquer l'arbre porte-fraise et l'enlever.
- Débloquer la tige de rappel et la desserrer de un tour maximum.
- Chasser avec un maillet la tige de rappel pour décoller l'arbre de son logement conique.
- Enlever l'arbre porte-fraise et la tige de rappel et les déposer sur la desserte.

Fraise à surfacer

Fraise en bout à deux tailles à surfacer, à dents rapportées en acier rapide fixées dans le corps de la fraise à l'aide de broches introduites de force entre le corps et les dents, et qui agissent ainsi comme un coin. Le genre d'attache au mandrin de cette fraise est rarement utilisé.

Matières utilisées pour les fraises et leurs caractéristiques

C'est l'acier à coupe rapide qui est utilisé sur un travail de production. Cette matière est la seule qui puisse en un outil monobloc, assurer des vitesses de coupes assez grandes.

L'alliage le plus utilisé est composé de :

18% de tungstène W, 4% de chrome (Cr), 1% de vanadium (Va), 1,2% de carbone (C). Le cobalt remplace aussi le tungstène pour environ 10 à 15%.

Ces aciers subissent :

- Une trempe à $1100/1300^{\circ}$, refroidissement dans l'air soufflé.
- Un revenu entre $350/600^{\circ}$ dans le plomb ou des sels fondus.

➤ ARS = acier rapide supérieur

Les outils en ARS sont constitués le plus souvent d'un barreau monobloc en acier rapide supérieur, l'arête de coupe est affûtée.

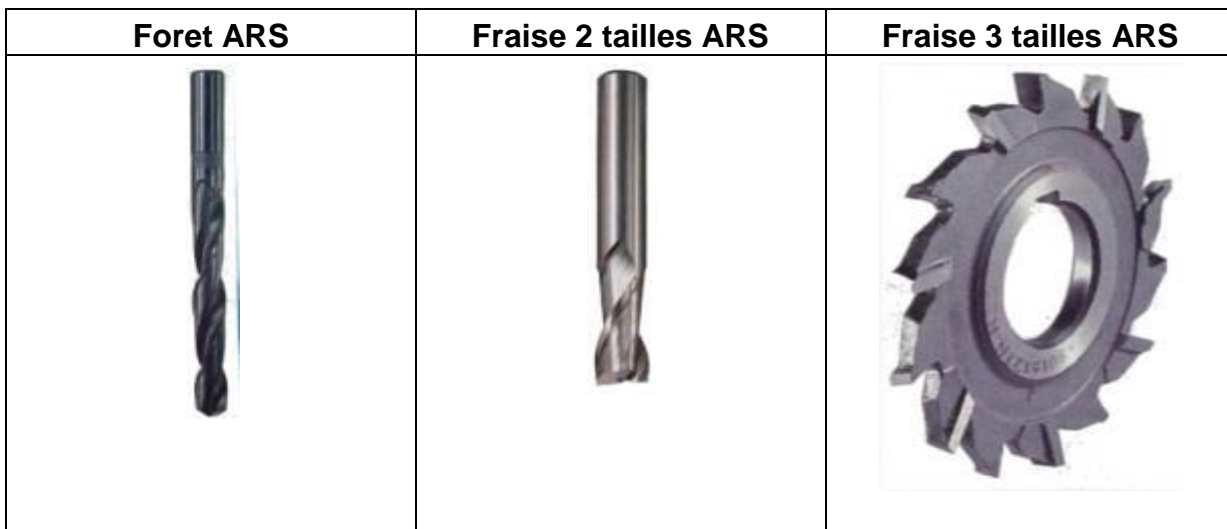


Figure I.5 Les outils en ARS

➤ Carbure

Pour améliorer les performances des outils, l'arête de coupe est placée sur une plaquette amovible en carbure. Ce matériau est très résistant par rapport à ARS. La plaquette carbure est obtenue en compressant différentes poudres de carbure. Dès que l'arête de coupe est usée, il suffit de changer la plaquette.

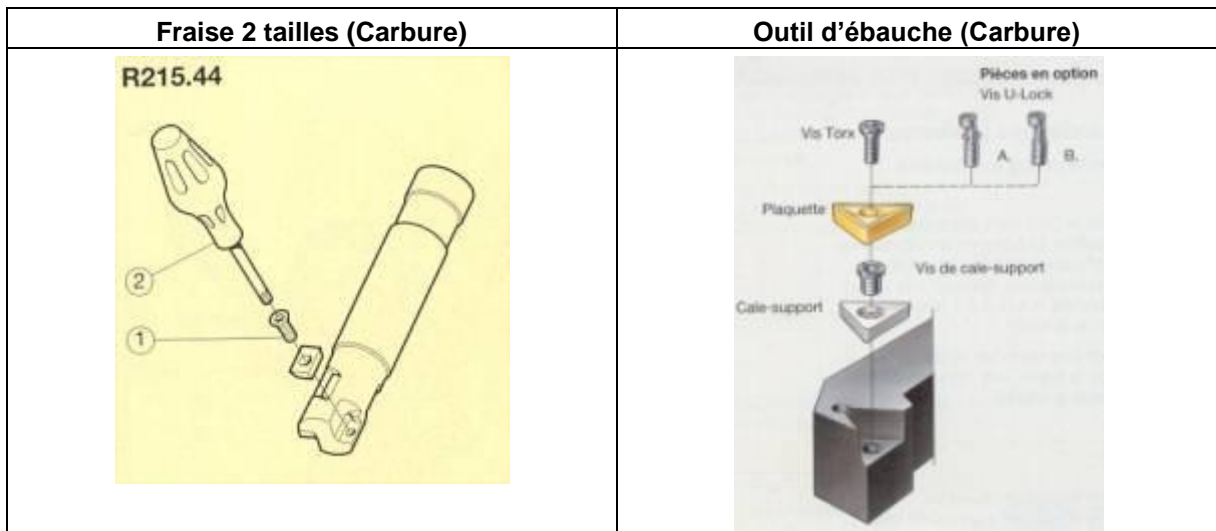


Figure I.6 plaquette amovible en carbure.

L'affûtage des fraises

Chaque outil s'use après une période de temps variable suivant la façon de l'employer et le travail à exécuter. L'outil doit être réaffûté afin de lui maintenir sa capacité de coupe.

L'affûtage est une opération d'enlèvement de matière. Elle doit être exécutée par un outil plus dur que la matière de l'outil à affûter. L'outil utilisé pour l'affûtage est une meule.

5) Les principes généraux de fraisage :

Les fraises peuvent présenter des arêtes tranchantes soit sur leur surface latérale, soit en bout, soit latéralement et en bout simultanément les fraises peuvent donc produire :

- Des surfaces planes parallèles à leur axe.
- Des surfaces planes obliques à l'axe de rotation.
- Des surfaces perpendiculaires à l'axe de la fraise.
- Des surfaces quelconques de forme indifféremment positionnées par rapport à l'axe.

Sur toutes les fraiseuses, la production de ces différentes surfaces est réalisée grâce à :-rotation de la fraise
-avance de la pièce

Ces différentes possibilités font apparaître 2 grands principes de fraisage :

- Fraisage de face ou fraisage en bout
L'axe de rotation de l'outil est perpendiculaire au plan fraisé.
- Fraisage de profil ou fraisages en roulant
L'axe de rotation de la fraise est parallèle à la surface usinée.

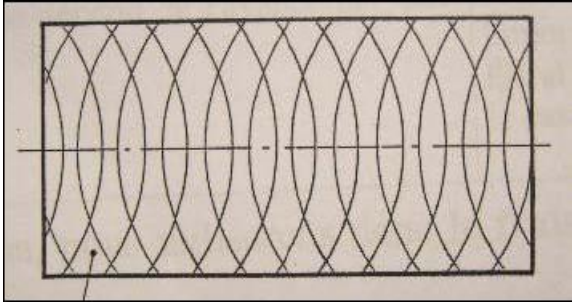
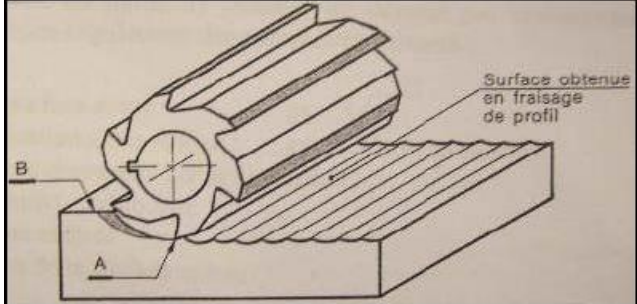
Fraisage de face	Fraisage de profil
<p>- Série de courbes séquentes appelées cycloïde (traces laissées par les dents de la fraise sur la pièce).</p> <p>- Intervalle compris entre deux cycloïdes représente l'épaisseur du copeau.</p> <p>- Bonnes conditions de coupe (état de surface bon).</p> 	<p>- Série d'ondulations (traces laissées par les dents de la fraise sur la pièce).</p> <p>- Chaque dent de la fraise taille un copeau d'épaisseur soit croissant, soit décroissant.</p> <p>-État de surface moins bon.</p> 

Figure I.7 différentes possibilités font apparaître

En conclusion, nous utiliserons donc le fraisage de face toutes les fois que ce sera possible.

Le choix du mode de fraisage dépend de :

- l'état de surface exigé
- la spécification géométrique
- la tolérance demandée sur la dimension
- la machine utilisée ; etc.....

Fraisage en opposition	Fraisage en avalant
<p>- M_a et M_c de sens contraire.</p> <p>- L'épaisseur du copeau est faible à l'attaque et maxi en fin de trajectoire.</p> <p>- Écrouissage de la matière (la matière n'est pas coupée mais plutôt repoussée) mauvais état de surface.</p> <p>- Usure plus importante et rapide de l'outil du au frottement.</p> <p>- Aucun dispositif de rattrapage de jeu n'est requis.</p>	<p>- M_a et M_c sont de même sens.</p> <p>- L'épaisseur du copeau est maxi à l'attaque de la matière (attention choc à l'entrée de la dent).</p> <p>- On utilise parfois un angle de coupe négatif (γ), qui augmente l'effort de coupe mais aussi la solidité de la dent (β plus grand).</p> <p>- requiert un dispositif de rattrapage de jeu afin de ne pas avoir un mouvement d'avance par saccades (par à-coups).</p>

Temps d'usinage sur fraiseuse :

Ainsi que pour chaque travail sur machines-outils, il est utile, pour des raisons de production et de programmation de fabrication, de connaître le temps nécessaire à l'exécution d'un quelconque usinage sur fraiseuse.

Le temps est calculé à partir des exigences du plan et de la pièce.

6) Les éléments de coupe

➤ La vitesse de coupe (Vc)

C'est la longueur de copeau débité pendant la durée d'une minute.

$$N = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d}$$

Vc : vitesses de coupe (m/min)

d : diamètre de la fraise (mm)

N : vitesse de rotation broche (tour/min)

➤ L'avance (A)

C'est le déplacement accompli par la pièce pendant la course de travail.

$$A = a \cdot Z \cdot N$$

A : avance de l'outil de coupe (mm)

a : avance par dents (mm/dents)

Z : nombre de dents de l'outil (/)

N : vitesse de rotation broche (tour/min)

➤ Le temps de coupe (Tc)

C'est le temps nécessaire à l'outil pour parcourir la pièce, ce y compris son entrée et sa sortie de la matière.

$$T_c = \frac{L}{A}$$

Tc : temps de coupe (min)

L : longueur totale d'usinage (mm)

A : avance de l'outil de coupe (mm/min)

$$L = (l + d) \cdot n$$

➤ Profondeur de passe

7) L'ablocage des pièces

Avant l'usinage des pièces, il faut s'assurer de :

- la mise en position de la surface usinée par rapport aux référentielles machines
- l'immobilisation de la pièce en cours d'usinage
- l'absence de déformation au moment de l'ablocage

➤ **Ablocage : conditions à satisfaire**

- Immobiliser la pièce en conservant la précision de la mise en position.
- Éviter les déformations au moment de l'ablocage et pendant l'usinage.
- Appliquez les efforts de serrage en face des appuis, dans une direction normale par apport à la surface de contact, sauf dans le serrage par clame.
- Les outils et les copeaux doivent pouvoir se dégager facilement.
- Permettre un montage et démontage rapide de la pièce.
- Permettre le contrôle en cours d'usinage.

➤ **Le dispositif d'ablocage**

• **Ablocage sur table**

La table de la fraiseuse constitue la première référence de mise en place de tous les systèmes porte pièce. Elle comporte des rainures en T, calibrées qui permettent de recevoir des cales ou des boulons à tête rectangulaire pour le maintien des pièces.

• **L'étai**

Se porte pièce est très utile pour l'ablocage en fraisage. Le serrage peut être assuré de façon mécanique, par action hydraulique ou pneumatique.

L'utilisation de morts spéciaux permet l'immobilisation des pièces cylindriques en position axe horizontal, ou verticale, l'immobilisation de pièces minces, et le fraisage de surface oblique.

- **Plateaux magnétiques**

Permet d'immobiliser des pièces magnétiques en libérant totalement la surface à usiner. Exige que la surface de contact de la matière avec le plateau soit usinée.

- **Plateau circulaire**

Se porte pièce est pourvu d'une table circulaire dont les rainures en T permettent le bridage des pièces de la même façon que sur la table de fraiseuse.

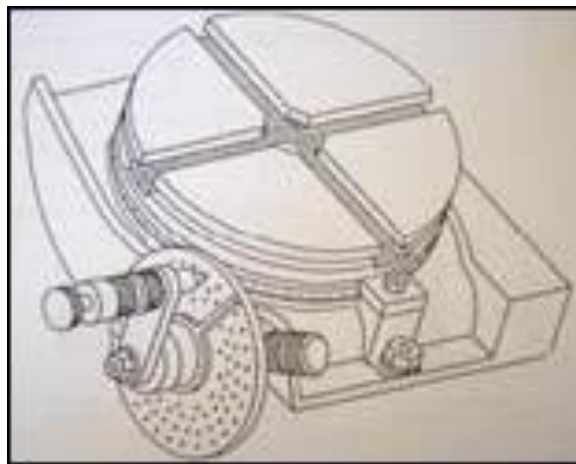


Figure I.8 Plateau circulaire

- **Plateau diviseurs**

C'est un appareil composé de la poupée diviseurs et d'une contrepointe. Il permet l'ablocage dans une position avec possibilités d'évolution angulaire.

Le plateau diviseurs permet différents montages de pièces :

- Montage en l'air
- Montage mixte
- Montage entres-pointes
- Montage sur mandrin de reprise

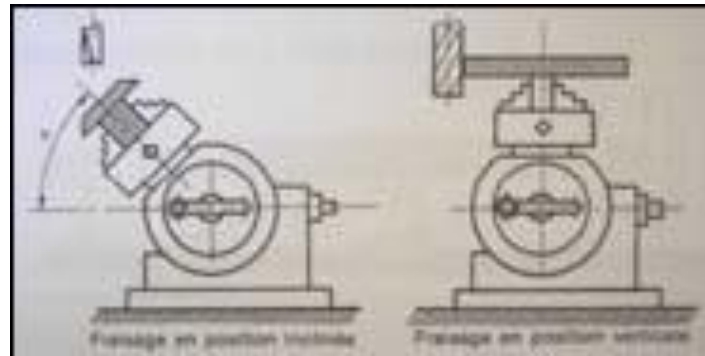


Figure I.9 Plateau diviseurs

8) L'appareil diviseur

L'appareil diviseur va permettre la réalisation d'une succession d'usinage qui nécessitent la rotation de la pièce entre ses usinages.

Il est constitué d'une poupée diviseurs (d) et d'une contre-pointe (c).

Les pièces se fixent sur la broche de la poupée diviseurs comme sur un tour.

La rotation de la pièce entre les usinages est assurée par la manivelle qui commande la vis sans fin qui peut engrener avec une roue à vis solidaire de la broche.

Un compas ou alidade à l'ouverture variable permet de régler une rotation déterminée de la manivelle.

Les méthodes de division

- La division directe
- La division simple
- La division composée
- La division différentielle

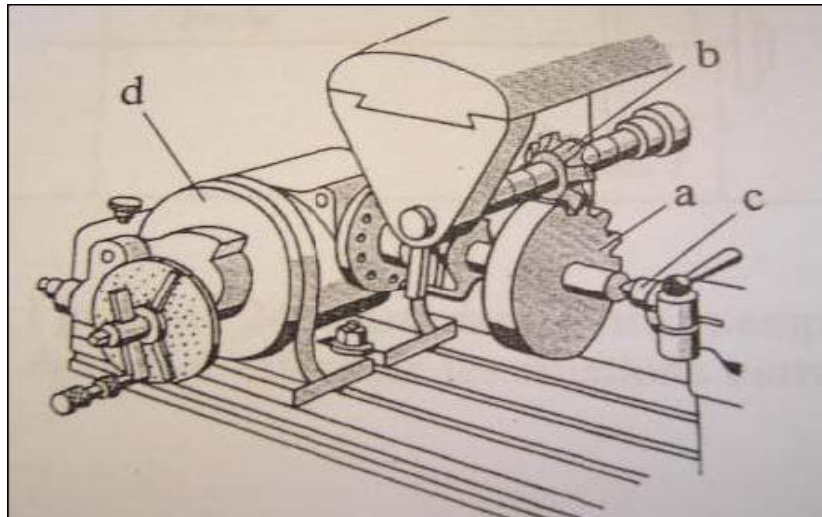


Figure I.10 Les méthodes de division

9) Graissage

Les fraiseuses demandent un graissage adéquat et constant de leurs organes mobiles.

- **Graissage forcé**
C'est un graissage automatique, obtenu au moyen d'une pompe commandée par le moteur de la machine.
Il sert au graissage de la boîte de vitesses des avances et des engrenages de commande de la broche.
- **Graissage semi-automatique**
Sert pour le graissage de l'ensemble de la console et des différents chariots.
- **Graissage par barbotage**
Employé pour graisser la boîte de vitesses de la broche et des avances.

1.Rappels

1.1.Les paramètres de coupe :

V_c : vitesse de coupe en m/min

f : avance par tour en mm/tr (tournage)

f_z : avance par tour en mm/dent (fraisage)

V_f : vitesse d'avance en mm/min

n : fréquence de rotation en tr/min (notée N dans certain livre)

D : diamètre de l'outil (fraisage)

D : diamètre de la pièce à usiner (tournage)

Z : nombre de dent de la fraise

a : profondeur de passe

1.2 Les formules de coupe :

Fréquence rotation de la broche :

$$\mathbf{n = (1000 * V_c) / (\pi * D)}$$

Vitesse d'avance en Tournage :

$$\mathbf{V_f = n * f}$$

Vitesse d'avance en Fraisage :

$$\mathbf{V_f = n * f_z * Z}$$

2.Le fraisage :

2.1.Choix de l'avance : (en mm/dent)

$$fz \text{ ébauche ARS} = 0.15 \times K$$

$$fz \text{ ébauche CARBURE} = 0.25 \times K$$

- $K=0.8$ pour des opérations de surfaçage.
- $K=0.5$ pour des opérations de rainurage, contournage, sciage.
- $K=0.3$ pour des opérations en plongées verticale (Ex : perçage avec une fraise).

$$fz \text{ finition ARS} = fz \text{ ébauche} \times 0.5$$

$$fz \text{ finition CARBURE} = fz \text{ ébauche} \times 0.4$$

2.2.Profondeur de passe : (en mm)

La profondeur de passe (ap) en fraisage est fonction du type d'opération réalisée et du type de denture (Ravageuse ou Lisse). Les dentures ravageuses limitent les efforts de coupes. Elles permettent de prendre des profondeurs de passe et des avances plus importantes

En surfaçage :

$$ap \text{ maxi} = 0.1 \times \Phi \text{ fraise}$$

En contournage :

- Ebauche (denture ravageuse)

$$ap \text{ maxi} = 0.6 \times \Phi \text{ fraise}$$

A condition que l'engagement latéral soit $< 0.5 \times \Phi \text{ fraise}$

- Finition (denture lisse)

- $ap \text{ maxi} = 1 \times \Phi \text{ fraise}$

A condition que l'engagement latéral soit $< 0.15 \times \Phi \text{ fraise}$

En Rainurage :

- Ebauche (denture ravageuse)
 $a_p \text{ maxi} = 0.6 \times \Phi \text{ fraise}$
- Finition (denture lisse)
 - $a_p \text{ maxi} = 0.3 \times \Phi \text{ fraise}$

Remarque

Les valeurs données sont des valeurs MAXI pour un serrage optimum. Si le serrage est sur une faible hauteur il faut diviser les valeurs par **2**

2.3. Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes (en m/min) **(ANNEXE1)**

3.Le perçage :

3.1.Choix de l'avance : (en mm/tr)

L'avance en perçage est fonction du diamètre du foret

- Foret hélicoïdal :

$$f \text{ perçage} = 0.01 \times \Phi \text{ foret}$$

- Foret à plaquette carbures :

$$f \text{ perçage} = 0.02 \times \Phi \text{ foret}$$

3.2.Profondeur de perçage : (en mm)

Profondeur de perçage entre débouillage ou brise copeaux :

- Diamètre foret <14 mm :

$$P = \Phi \text{ foret}$$

- Diamètre foret >14 mm :

$$P = 0.5 \times \Phi \text{ foret}$$

3.3.Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes (ANNEXE 2)

4.Le taraudage :

4.1.Choix de l'avance : (en mm/tr)

$$\mathbf{f \text{ taraudage} = \text{pas du file}}$$

Rappel :

Ci-dessous sont indiqués les pas pour les \varnothing des vis les plus courantes.

Φ vis	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M16	M20
Pas	0.5	0.7	0.8	1	1.25	1.5	1.75	2	2.5

4.2.Diamètre perçage avant taraudage : (en mm)

- Diamètre vis <10 mm :

$$\Phi \text{ perçage} = \Phi \text{ vis} - \text{Pas}$$

- Diamètre vis >10 mm :

$$\Phi \text{ perçage} = \Phi \text{ vis} - (1.2 \times \text{Pas})$$

Dans le cas de matériaux très durs prendre 1.3 à la place de 1.2

4.3.Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes (en m/min)

(ANNEXE 3)

5.L'alésage :

5.1.Diamètre ébauche avant alésage :

$$\Phi \text{ ébauche} = \Phi \text{ alésage} - (0.02 \times \Phi \text{ alésage})$$

Remarque :

Les vitesses de coupe en alésage sont relativement basses pour ne pas détruire les arêtes de coupes secondaires

Les vitesses d'avance sont relativement grandes pour éviter la coupe en dessous du copeau minimum et ainsi garantir la qualité de l'alésage

5.2.Choix de l'avance : (en mm/tr)

L'avance en alésage est fonction du diamètre de l'alésage

$$f \text{ alésage} = 0.02 \times \Phi \text{ Alésage}$$

5.3.Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes (en m/min)

(ANNEXE 4)

6. PROBLEMES & SOLUTIONS

PROBLEMES	SOLUTIONS									
	Réduire la vitesse de coupe	Augmenter la vitesse de coupe	Réduire l'avance	Augmenter l'avance	Réduire la profondeur de coupe	Augmenter la profondeur de coupe	Choisir une nuance plus résistance à l'usure	Choisir une nuance plus tenace	Choisir un petit rayon de bec	Choisir une géométrie positive
Usure en dépouille rapide	X						X			
Usure en entaille	X						X			
Usure en cratère rapide	X		X				X			X
Déformation plastique	X		X				X			
Formation d'arête rapportée		X								X
Petites fissures perpendiculaires à l'arête de coupe								X		
Petites fractures de l'arête (écaillage)		X						X		X
Rupture de plaquette			X		X			X		
Copeaux longs enchevêtrés				X		X			X	
Vibration	X			X	X				X	X

I. La rugosité

La confusion est souvent faite entre le degré de propreté et la rugosité d'une surface, il important de rappeler que ces deux notions sont différentes et totalement indépendantes l'une de l'autre.

- la propreté est une caractéristique chimique.
- la rugosité est une caractéristique physique

La rugosité peut être considérée comme un élément complémentaire du degré de soins (état de propreté) ou comme l'élément essentiel de contrôle, suivant la nature des traitements ou revêtements postérieurs .

1. Définition

La rugosité est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière .

2. Principaux paramètres de la rugosité

Un grand nombre de critères sont définis dans la normalisation pour caractériser une rugosité. En pratique, dans un profil et sur une longueur considérée, seuls trois d'entre eux sont retenus:

- "Ra": écart moyen, c'est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts, entre les pics et les creux. "Ra" mesure la distance entre cette moyenne et la ligne centrale. On admet couramment que cette notion synthétise approximativement les différents paramètres intéressés dans la rugosité.
- "Rt": écart total, c'est la dénivellation la plus importante entre le plus haut sommet d'un pic et le fond le plus bas d'un creux.
- "Rz": régularité, c'est la moyenne des écarts totaux de rugosité "Rt" observés sur 5 longueurs .

2.1. Paramètres liés aux motifs et à la ligne enveloppe

Le motif est une portion de profil comprise entre deux pics, il est caractérisé par sa largeur ou pas et par la profondeur de chacun de ses cotés .

Les paramètres liés aux motifs peuvent être évalués graphiquement en traçant la ligne enveloppe supérieure et la ligne enveloppe inférieure.

Ces motifs déterminent la profondeur moyenne de rugosité R et son pas moyen AR voir figure I.1.

La ligne enveloppe supérieur permet de déterminer les motifs d'ondulation et de calculer la profondeur moyenne d'ondulation W et son pas AW voir figure I.2.

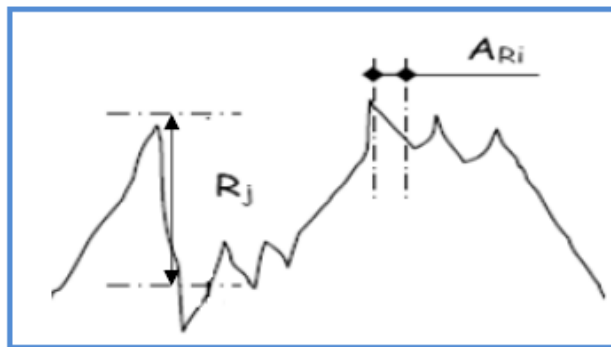


Figure III.1 Paramètres liés aux motifs

$$R = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m R_j$$

$$AR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AR_i$$

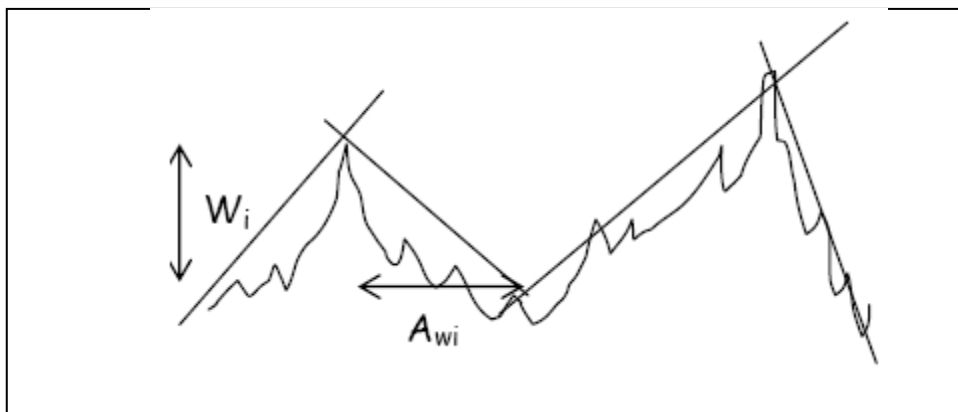


Figure III. 2 Paramètres d'ondulation

$$Aw = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Aw_i \quad \text{Pas moyen}$$

$$W = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m W_j \quad \text{Profondeur moyenne}$$

2.2. Paramètres liés à la ligne moyenne

La référence pour le calcul des paramètres dans la définition ISO 4287/1, est la ligne des moindres carrés calculée sur une longueur de base. la valeur moyenne des valeurs trouvées sur cinq longueurs de base.

Les principaux paramètres liés à la ligne moyenne sont indiqués comme suit :

-Au niveau de la longueur de base :

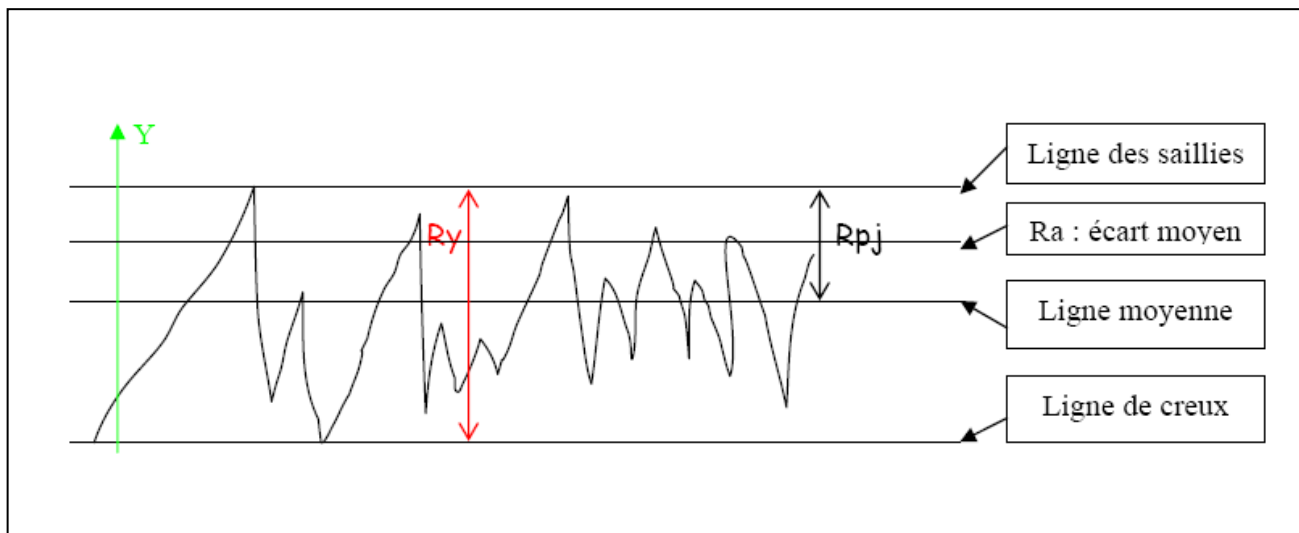


Figure III. 3 Paramètres liés à la longueur de base

R_{pj} : distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne

R_{aj} : écart moyen arithmétique du profil

$$R_{aj} = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| \cdot dx$$

R_y : distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux

R_p : Représente la moyenne des R_{pj}

$$R_p = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_{pj}$$

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_{aj}$$

-Au niveau de la longueur d'évaluation

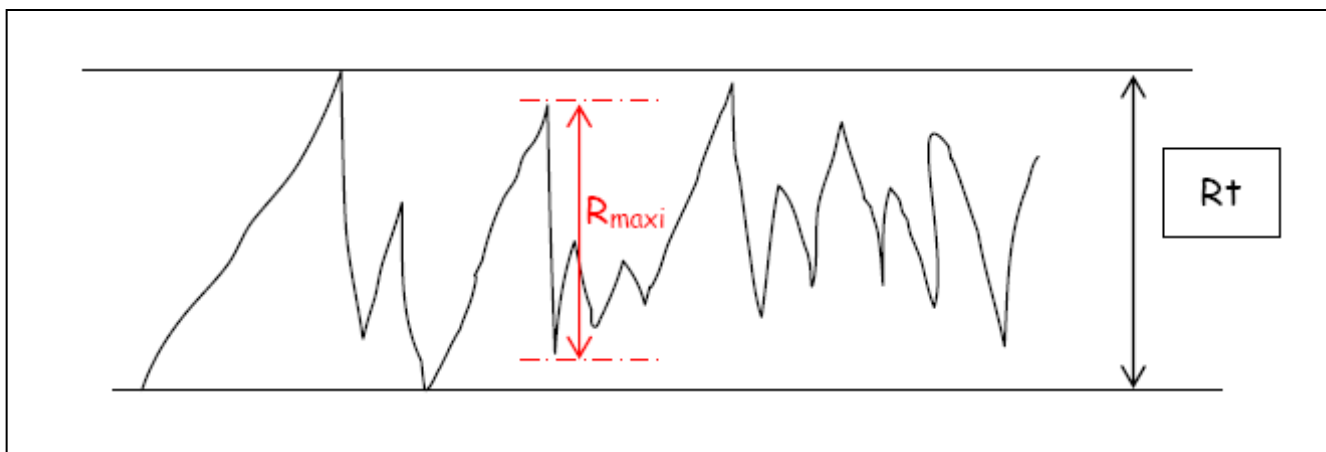


Figure III. 4 Paramètres liés à la longueur d'évaluation

R_t : c'est le plus grand des R_y (R_y étant dans la longueur de base, on choisit le plus grand R_y compris dans la longueur d'évaluation). On considère que R_t est plus au moins équivalente à R_y

R_{max} : c'est le plus grand écart entre une saillie et un creux consécutif

2.3 Paramètres liés à la distribution d'amplitude

Ces paramètres sont calculés soit sur le profil total sur toute la longueur d'évaluation L , soit sur le profil de rugosité sur une longueur qui peut être plus grande que la longueur de base.

Distribution d'amplitude : C'est la fonction de densité de probabilité des points du profil. La forme de cette distribution peut être caractérisée par les paramètres Rq , Sk , et Ek correspondant aux moments centrés d'ordre 2,3 et 4, qui sont utilisés en tribologie pour simuler dans les modèles mathématiques le comportement de la surface .

Taux de portance T_p représenté par la courbe D'Abbott-Firestone, c'est la courbe cumulée de distribution d'amplitude en fonction de la profondeur de coupe (c) elle représente le pourcentage réelle qui porterait sur une surface plane après usure hypothétique égale à (c) voir figure I.5.

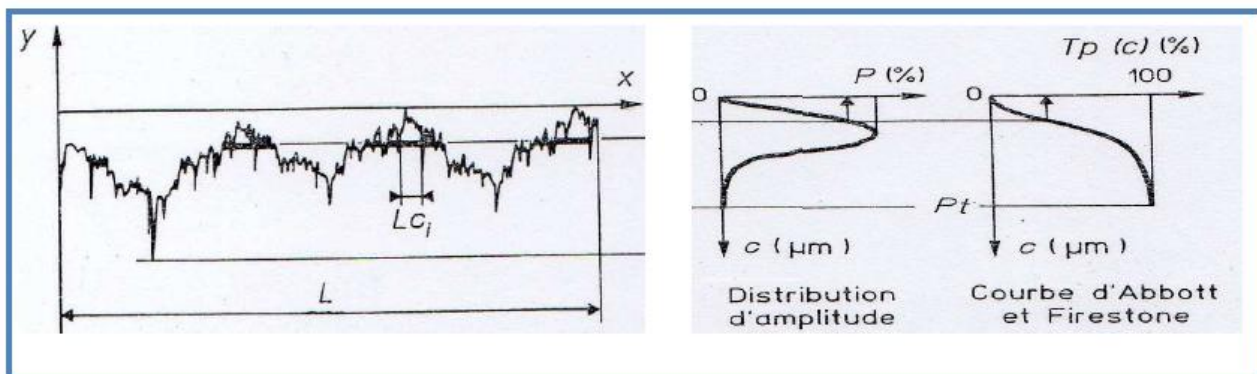


Figure III.5 Paramètres liés à la distribution d'amplitude

C : (μm) profondeur de coupe

Lci : longueur de coupe élémentaire

P : (%) densité de probabilité des points du profil

Pt : profondeur totale du profil

Tp (C) : taux de longueur portante (% de longueur portante après une usure hypothétique égale à (C))

D'où l'on peut mettre en évidence ces paramètres de surface dans les calculs d'un contact mécanique, donc connaître la topographie de surface est devenu un élément important en tribologie.

3 Mesure de la rugosité

Lorsque les comparaisons visuelles et tactiles ne sont pas suffisantes pour distinguer une différence de rugosité entre deux surfaces, on utilise un rugosimètre qui détermine de manière sûre et précise un certain nombre de paramètres de rugosité (Ra, Rz...).

Parmi les applications industrielles nécessitant l'utilisation d'un rugosimètre on peut citer les domaines suivants :

- **Mécanique:** l'optimisation de la rugosité permet un meilleur ancrage mécanique, notamment au sein de dispositifs où les forces de friction jouent un rôle fonctionnel prépondérant (ex: cônes morses).
- **Qualité:** l'utilisation d'un rugosimètre permet le contrôle de la qualité de finition en bout de chaîne de production, permettant de détecter et de corriger d'éventuels problèmes survenus durant l'usinage.
- **Recherche:** la mesure de la rugosité permet d'évaluer la qualité d'un nouvel enduit ou procédé de traitement de surface .

4 Analyse de la surface

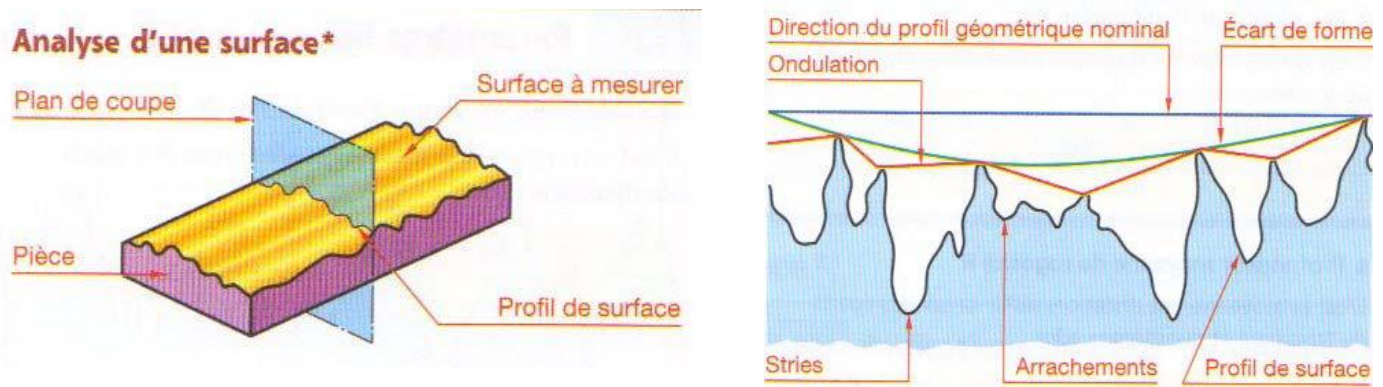


Figure III.6 *Analyse de la surface*

- **Défauts de 1er ordre** : écarts de forme
- **Défauts de 2ème ordre** : ondulation (ligne enveloppe supérieure)
- **Défauts micro géométriques** : caractérisent la rugosité de la surface (3ème ordre : stries et sillons ; 4ème ordre : arrachements, fentes...)

5- Les paramètres de la rugosité

Rugosité R_z : Hauteur maximal du profil

Distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux

Rugosité R_a : Écart moyen arithmétique du profil.

Correspond à la moyenne des valeurs absolues des écarts entre le profil et une ligne moyenne de ce profil.

Remarque : valeurs exprimées en μm

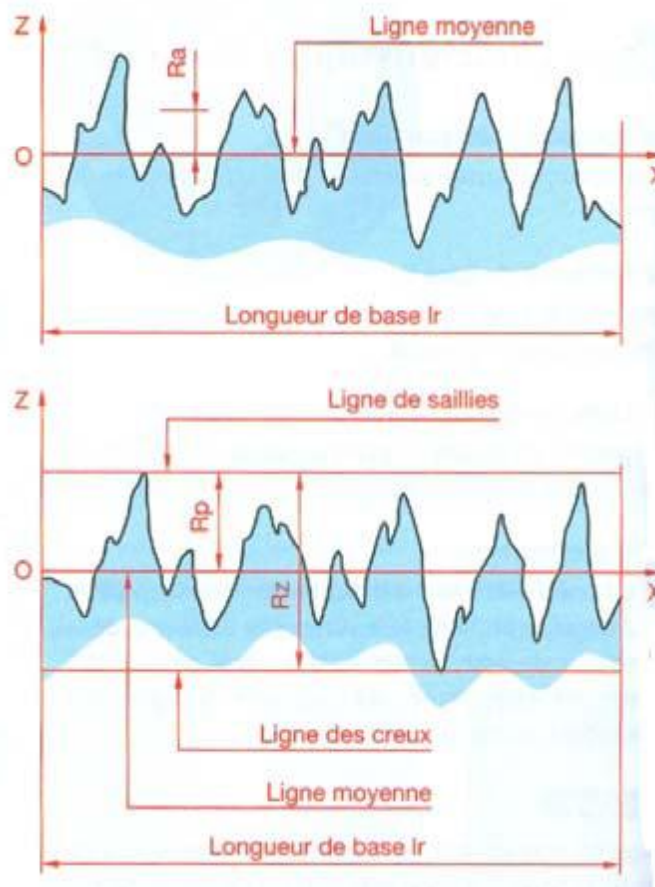


Figure III.7 Les paramètres de la rugosité

6- Inscription normalisée d'un état de surface

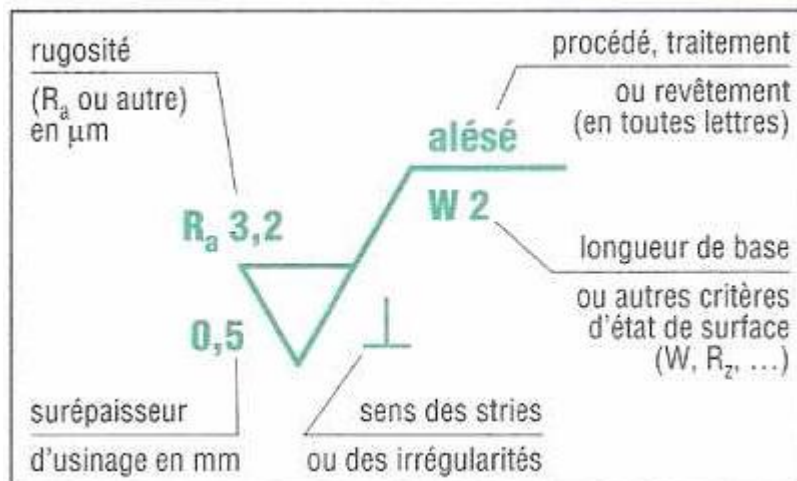
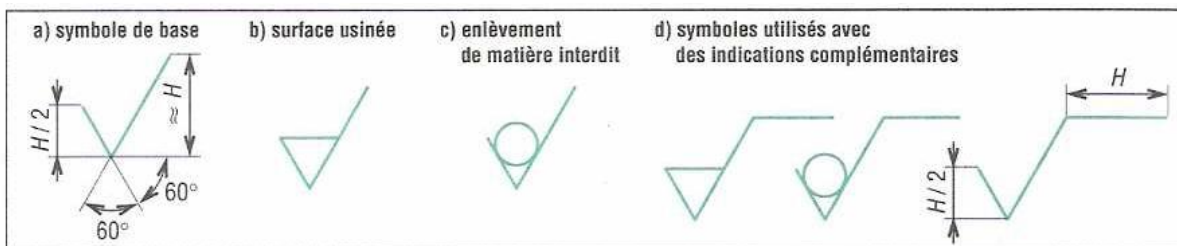


Figure III.8- Inscription normalisée d'un état de surface

Le R_a (écart moyen arithmétique) est l'indicateur de rugosité le plus utilisé sur les dessins de définition.

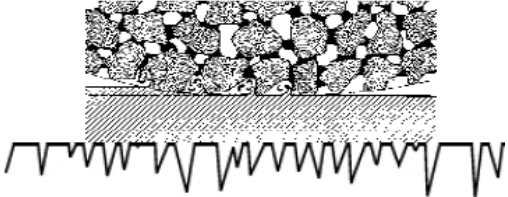
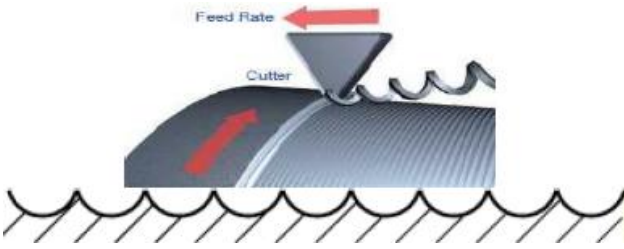
7 - Fonctions et états de surface

Fonction Exemple	d'application	Ra
Frottement de glissement	Glissière de machines-outils	0,4
Frottement de roulement	Chemin de roulement à billes	0,02
Étanchéité dynamique	Portée pour joint à lèvres	0,3
Étanchéité statique	Surface d'étanchéité glacée (sans joint)	0,1
Ajustement fixe avec contrainte	Portée de roulement	0,8
Outils coupants (arête)	Outils en carbure	0,2

8- Procédés d'élaboration et états de surface

Procédé d'obtention	Rugosité moyenne Arithmétique : Ra											
	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.025
Moulage en sable	■	■	■	■								
Moulage en cire perdue				■	■	■	■	■				
Moulage en moule métallique				■	■	■	■	■				
Moulage sous pression				■	■	■	■	■	■			
Matricage à chaud		■	■	■	■	■	■	■				
Fraisage carbure					■	■	■	■	■	■		
Tournage ébauche	■	■	■	■	■	■	■	■				
Tournage finition				■	■	■	■	■	■	■		
Tournage outil diamant carbure					■	■	■	■	■	■	■	
Perçage au foret			■	■	■	■	■	■				
Alésage à l'outil				■	■	■	■	■	■			
Alésage à l'alésoir				■	■	■	■	■	■	■		
Alésage outil diamant carbure					■	■	■	■	■	■	■	
Brochage				■	■	■	■	■	■	■		
Rectification de production					■	■	■	■	■	■		
Rectification de précision						■	■	■	■	■	■	
Rodage au rodoir							■	■	■	■	■	■
Polissage mécanique								■	■	■	■	■
Superfinition										■	■	■
Galetage								■	■	■	■	■

Remarque : Toute surface élaborée avec enlèvement de copeaux présente une structure typique marquée par l'avance d'arête et la géométrie d'arête.

Rectification	Tournage
	

9 - Procédés permettant une faible rugosité

9-1- Rodage :

Principe : Procédé par abrasion qui consiste à un frottement de deux pièces entre lesquelles on place une pâte abrasive

Ra obtenu : 0,02

Quantité de matière enlevée : souvent inférieure à 0,01 mm

Intégration dans le processus : nécessite souvent une rectification

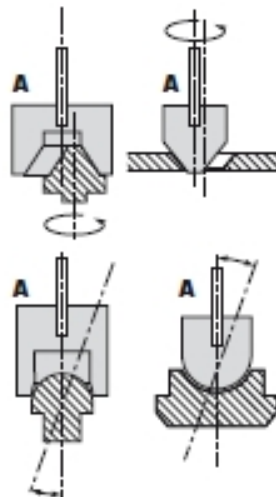
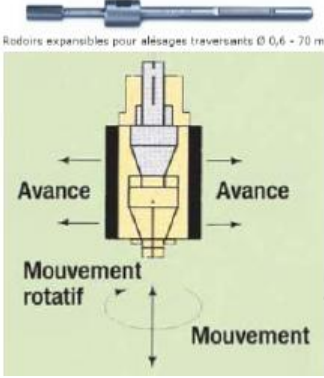





Figure III.9 Rodage :

Rodoir expansible	Mandrin pour rodoir expansible	Machine à roder
 <p>Rodoirs expansibles pour alésages traversants Ø 0,6 - 70 mm</p>		
<p>Les rodoirs diamant permettent l'usinage de toutes les matières (acier trempé, acier non trempé, carbure, titane, aluminium, céramique, verre, etc ...) avec des états de surface très poussés.</p>	<p>Les têtes micrométriques, d'un maniement très simple et d'une mise en oeuvre rapide, s'utilisent sur toutes machines telles que perceuses, fraiseuses, tours ainsi que sur les machines à roder.</p>	

9-2- Superfinition :

Principe : La différence essentielle entre superfinition et rectification porte sur le mouvement de coupe de l'abrasif. L'action très rapide de la meule est remplacée par celui d'une bande abrasive à mouvement rectiligne alternatif. L'abrasif travaille à faible vitesse.

Ra obtenu : 0,02. La longueur de contact en la bande et la pièce étant importante, ce procédé améliore aussi les défauts de formes

Quantité de matière enlevée : souvent inférieure à 0,01 mm

Intégration dans le processus : la rectification préalable n'est pas nécessaire si un tournage fin à été réalisé.

Figure : adaptation d'un dispositif de superfinition sur tour CN =>

9-3- Galetage :

Principe : Le galetage est un procédé d'usinage sans enlèvement de matière qui consistant à lisser et à compacter la surface des matériaux.

Ra obtenu : 0,1

Intégration dans le processus : Est placé à la suite d'autres procédés : usinage, rectification...

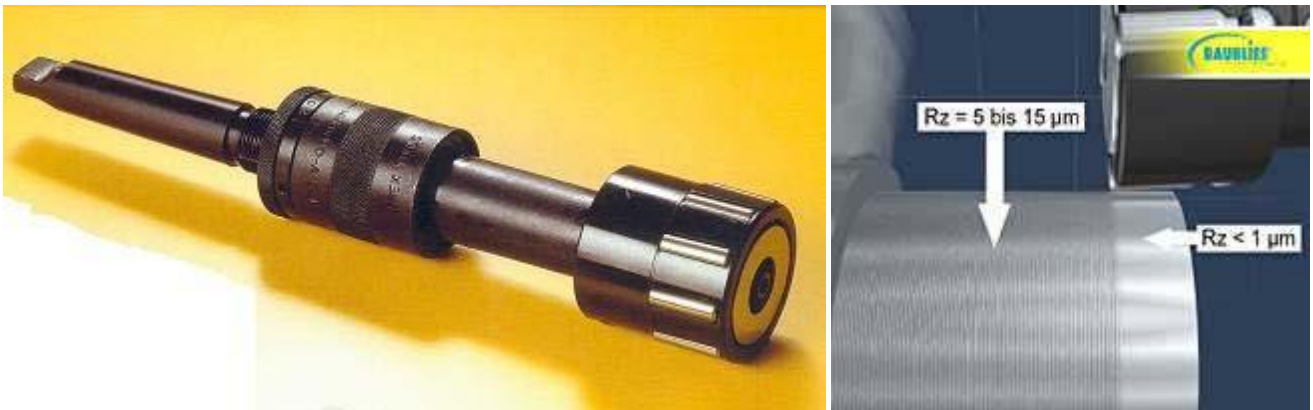


Figure III.10 : Galetage

10- Évacuation de la rugosité

10-1- Plaquette d'échantillons visuo-tactiles :

Ref. : 99ATEST003

Rugotest 3

Classe	N 6	N 7	N 8	N 9	N 10	N 11
Rugosité Ra (μm)	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25



10-2- Machine portable :

RUGOSIMETRE



I.11 Conclusion

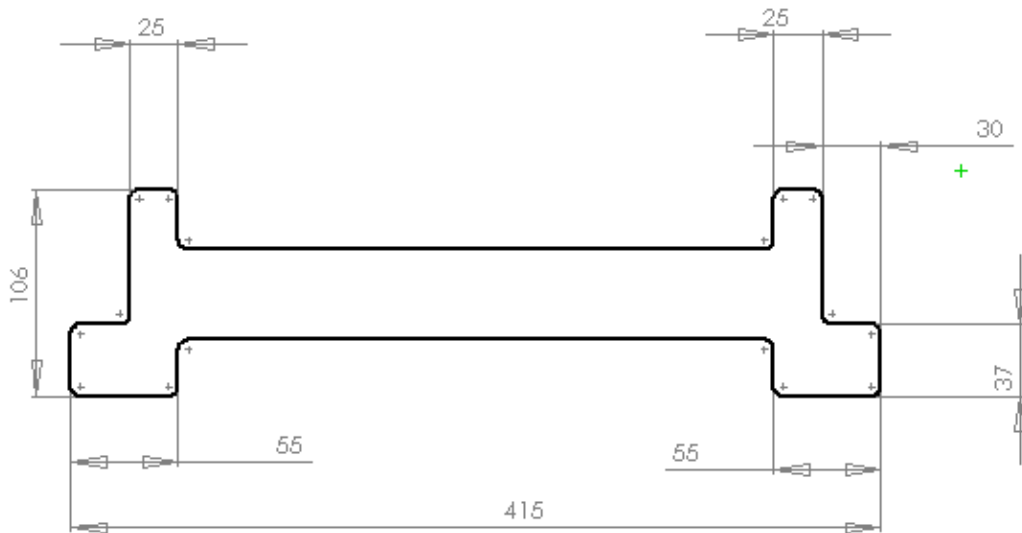
L'objectif de ce chapitre est de montrer l'importance de la rugosité dans un système mécanique. Dans le domaine de la tribologie (usure, frottement, lubrification), elle représente un des paramètres qui caractérise la topographie de surface, et intervient dans les calculs de l'épaisseur du film lubrifiant. La qualité de surface est un élément de concurrence dans l'industrie, elle constitue un élément tranchant pour le fabricant qui reste toujours motivé pour innover de nouvelle gamme d'usinage, améliorer les performances des machines outils, créer des gammes d'outillage qui s'adapte avec la technique moderne d'usinage, d'où ressort l'intérêt des procédés d'usinage, tels que le tournage, la rectification, et le traitement mécanique de surface.

Routage d'usinage du Support (Enrouleuse de tôles)

N° De phase	Sous Phase – opération	Machines – outils
100	Contrôle du brut	Atelier de contrôle
200	<p>Fraisage</p> <p><u>210</u> : Surfaçage de P1 211 : Ebauchage de P1 212 : Finition de P1</p> <p><u>220</u> : Surfaçage de P2 221 : Ebauchage de P2 222 : Finition de P2</p>	Fraiseuse verticale
300	<p><u>310</u> : Fraisage de P3 . P4</p> <p>311 : Ebauchage de P3 Finition de P3</p> <p>312 : Ebauchage de P4 Finition de P4</p> <p><u>320</u> : fraisage de P5</p> <p>321 : Ebauchage de P5 322 Finition de P5</p> <p><u>330</u> : fraisage de P6</p> <p>331 : Ebauchage de P6 332 : Finition de P6</p> <p><u>340</u> : fraisage de P7 . P8 341 : P7 E . P7 F 342 : P8 E . P8 F</p>	Fraiseuse verticale
400	400 : taraudage de P9	Fraiseuse verticale
500	<p><u>510</u> : Perçage de P10 F</p> <p><u>520</u> : Perçage de P11 F</p>	Perceuse a colon
600	<p><u>610</u> : perçage de P12 611 :Perçage de p12 F</p> <p><u>612</u> : Alésage de P12 613 : alésage 19H7 de P12</p> <p><u>620</u> : perçage de P13 621 :Perçage de p13 F</p> <p><u>622</u> : Alésage de P13 623 : alésage 19H7 de P13</p>	Perceuse a colon

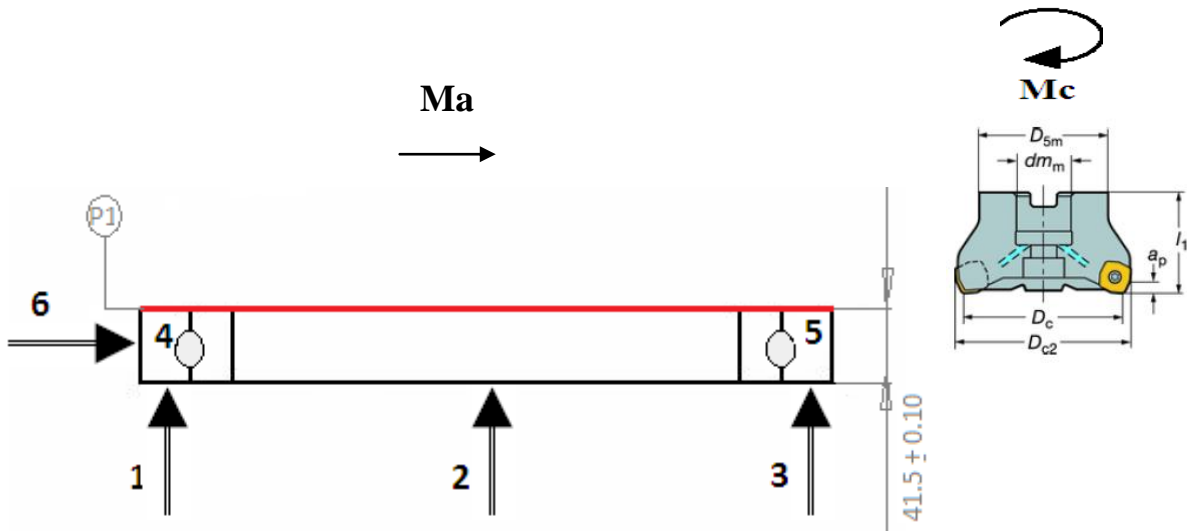
700	<u>710</u> : fraisage de P14 711 : Ebauchage de p14 712 : F Finition de P14 <u>720</u> : chonfrinage de p15 <u>730</u> : chonfrinage de p16	Fraiseuse verticale
800	Contrôle de la pièce finie	Atelier de contrôle

CONTRAT DE PHASE PREVISIONNEL PHASE N° : 100	ENSEMBLE: Enrouleuse de tôles	DATE:	
	PIECE:SUPPORT		1/1
	MATIERE: A37		
NOM:	PROGRAMME: Unitaire		
DESIGNATION: CONTROLE DU BRUT			
MACHINE: Atelier de contrôle			



OPERATIONS	OUTILS	Vc	f/fz	N	ap
Contrôle de la pièce brut Atelier de contrôle Vérifier capabilité du brut Epaisseur =40mm	Pied à coulisse + Règle				
CONTRAT DE	ENSEMBLE: Enrouleuse de tôles	DATE:			

PHASE PREVISIONNEL PHASE N° : 200 Sous phase : 210	PIECE:SUPPORT		1/2
	MATIERE: A37		
NOM:	PROGRAMME: Unitaire		
DESIGNATION: FRAISAGE			
MACHINE: FRAISEUSE VERTICALE			



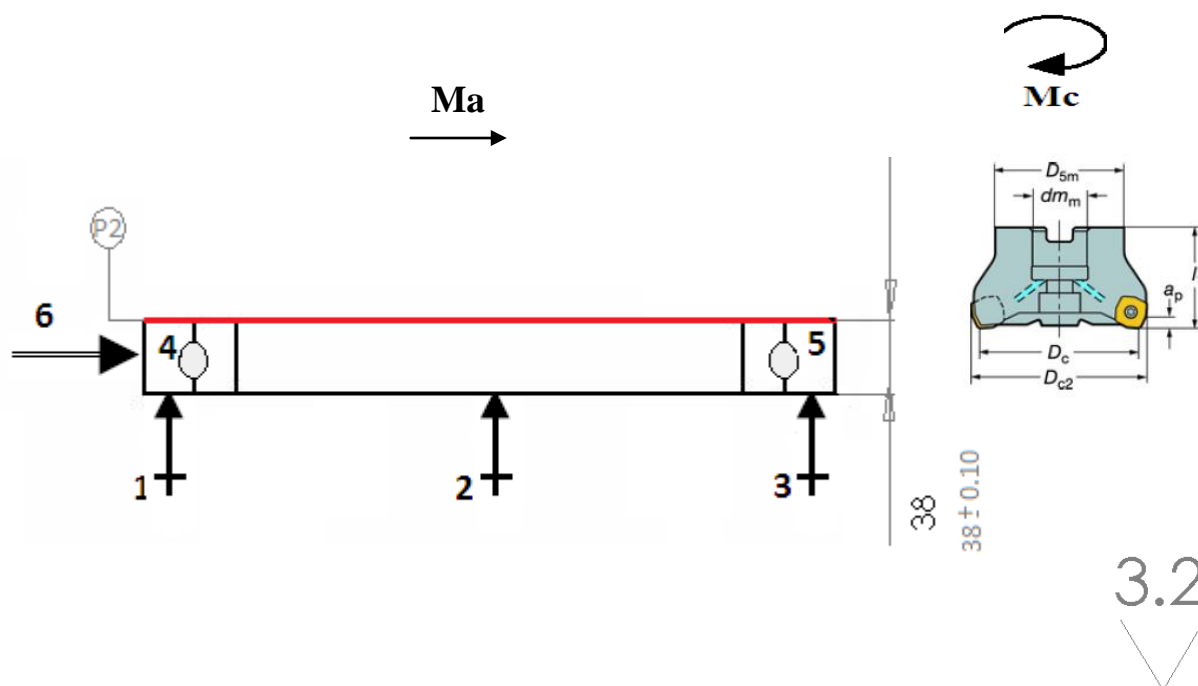
3.2

OPERATIONS	OUTILS	Vc	f/fz	N	ap
210 : Surfaçage de p1	Montage sur étou				
	Fraise 2 taille à	120	0.2	557.32	2
	plaquette carbure				
211 : P1 E	métallique Ø80	140	0.05	477.7	0.5
212 : P2 F	+				
	Pied a coulisse				
	+				
	Règle				
Cm= 41.5					

CONTRAT DE PHASE PREVISIONNEL PHASE N° : 200 Sous phase : 220	ENSEMBLE: Enrouleuse de tôles	DATE:	
	PIECE:SUPPORT		
	MATIERE: A37	2/2	
NOM:	PROGRAMME: Unitaire		

DESIGNATION: FRAISAGE

MACHINE: FRAISEUSE VERTICALE

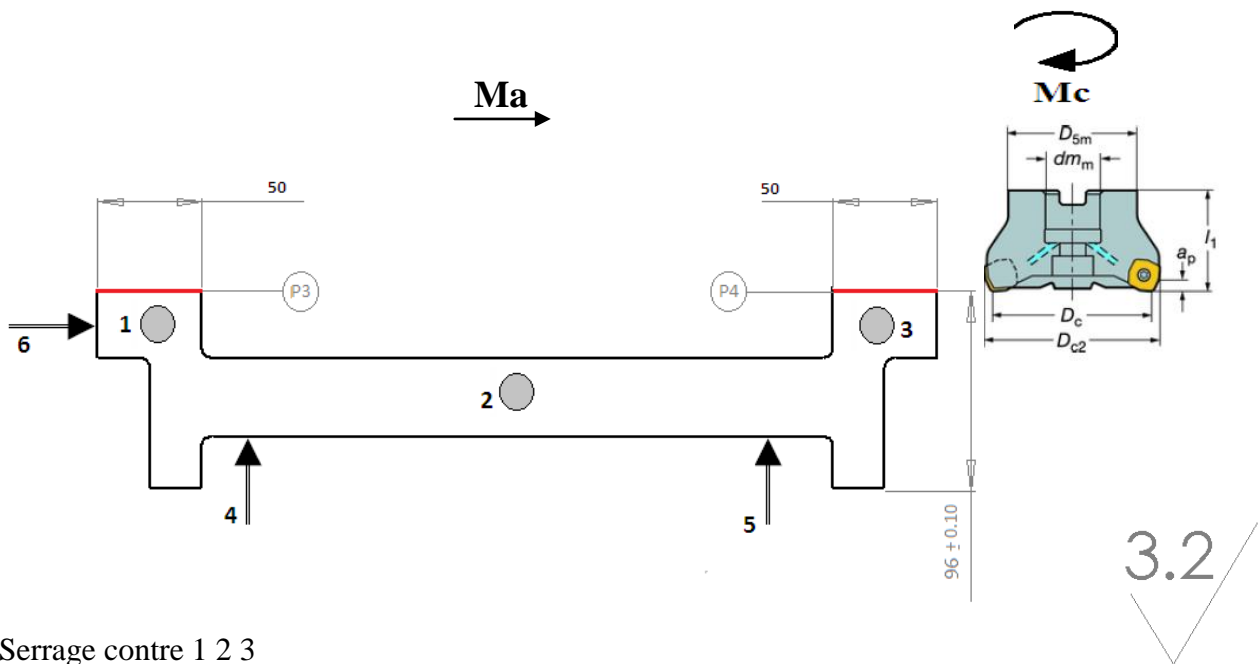


OPERATIONS	OUTILS	Vc	f/fz	N	ap
210 : Surfaçage de p2	Montage sur étau				
	Fraise 2 tailles à	120	0.2	557.32	2
221 : P2 E	plaquette carbure				
222 : P2 F	métallique Ø80	140	0.05	477.7	0.5
Cm = 38	+ Pied a coulisse + Règle				

CONTRAT DE PHASE PREVISIONNEL PHASE N° :300 Sous phase : 310	ENSEMBLE: Enrouleuse de tôles	DATE:	
	PIECE:SUPPORT	1/4	
	MATIERE: A37		
NOM:	PROGRAMME: Unitaire		

DESIGNATION: FRAISAGE

MACHINE: FRAISEUSE VERTICALE

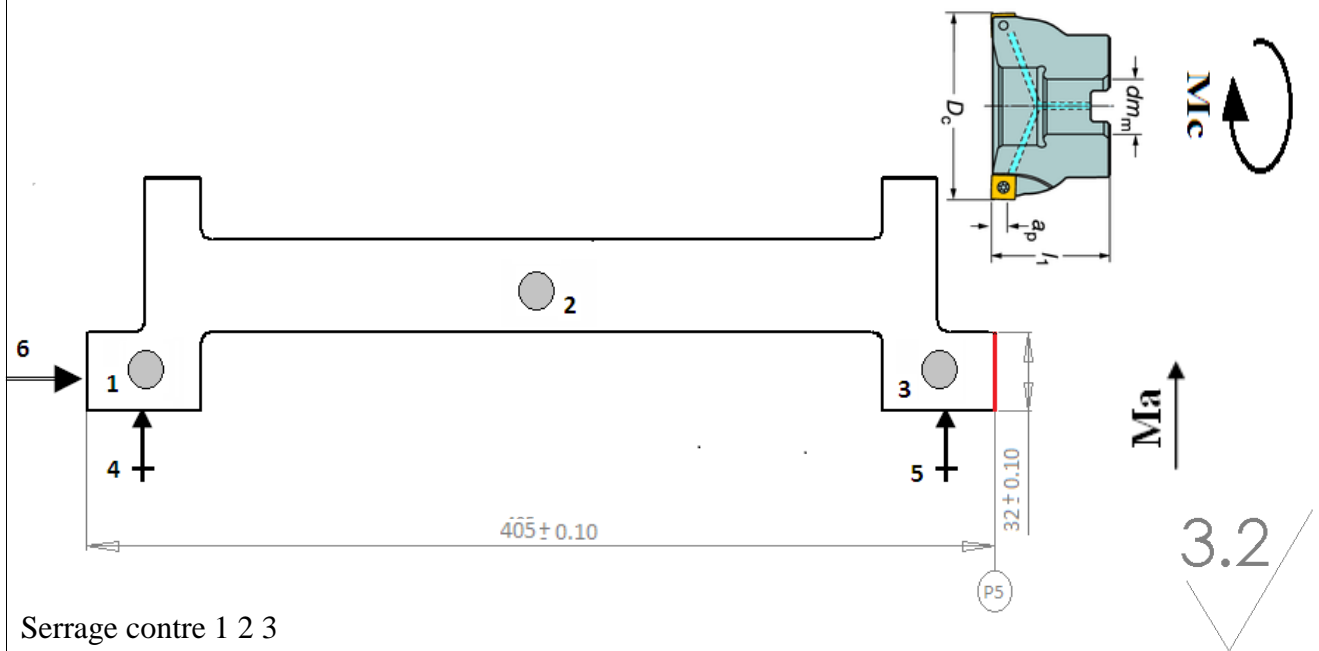


OPERATIONS	OUTILS	Vc	f/fz	N	ap
310 : Fraisage de P3 . P4	Montage sur				
311 : P3 E . P3 F	étau	120	0.2	557.32	2
312 : P4 E . P4 F	Fraise 2 tailles à				
Cm = 96 ± 0.1	plaquette	140	0.05	477.7	0.5
	carbure				
	métallique Ø80				
	+				
	Pied a coulisse				
	+				
	Règle				

CONTRAT DE PHASE PREVISIONNEL PHASE N° : 300 Sous phase : 320	ENSEMBLE: Enrouleuse de tôles	DATE:	
	PIECE:SUPPORT	2/4	
	MATIERE : A37		
NOM:	PROGRAMME: Unitaire		

DESIGNATION: FRAISAGE

MACHINE: FRAISEUSE VERTICALE

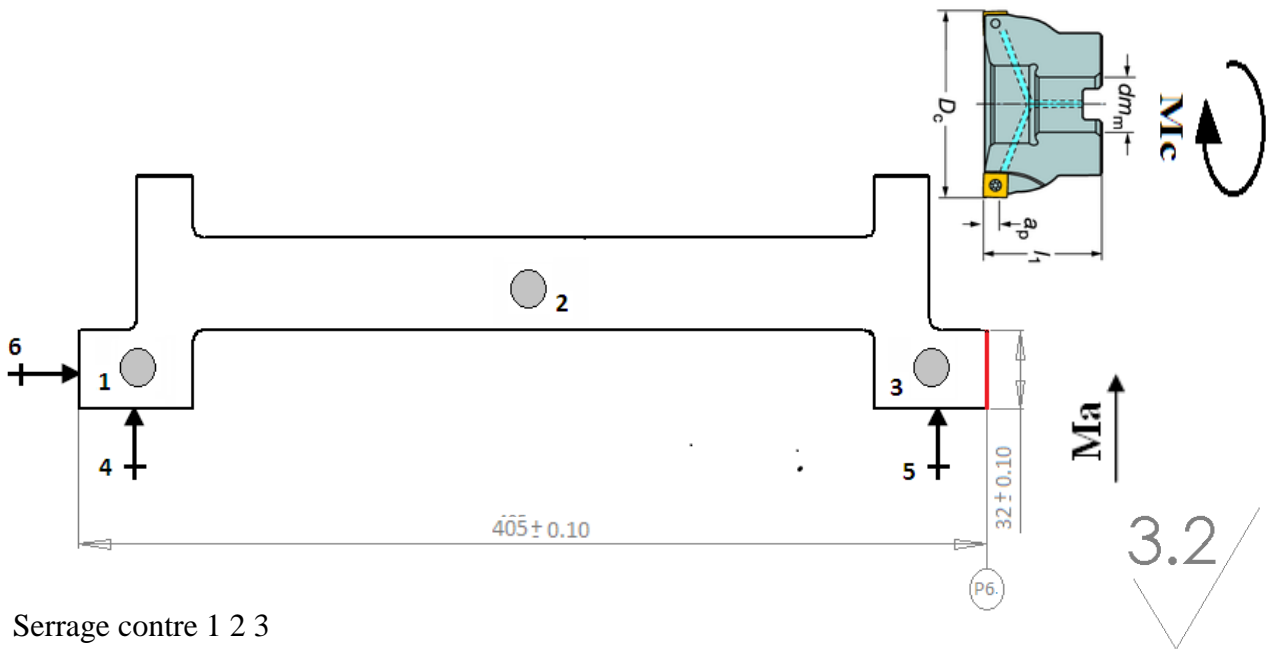


OPERATIONS	OUTILS	Vc	f/fz	N	ap
320 : fraisage de P5					
321 : P5 E	Montage sur étau	120	0.2	557.32	2
322 : P5 F	Fraise 2 taille à plaquette carbure métallique Ø80	140	0.05	477.7	0.5
Cm = 405 ± 0.1	+ Pied a coulisse + Règle				

CONTRAT DE PHASE PREVISIONNEL PHASE N° : 300 Sous phase : 330	ENSEMBLE: Enrouleuse de tôles	DATE:	
	PIECE:SUPPORT	3/4	
	MATIERE: A37		
NOM:	PROGRAMME: Unitaire		

DESIGNATION: FRAISAGE

MACHINE: FRAISEUSE VERTICALE



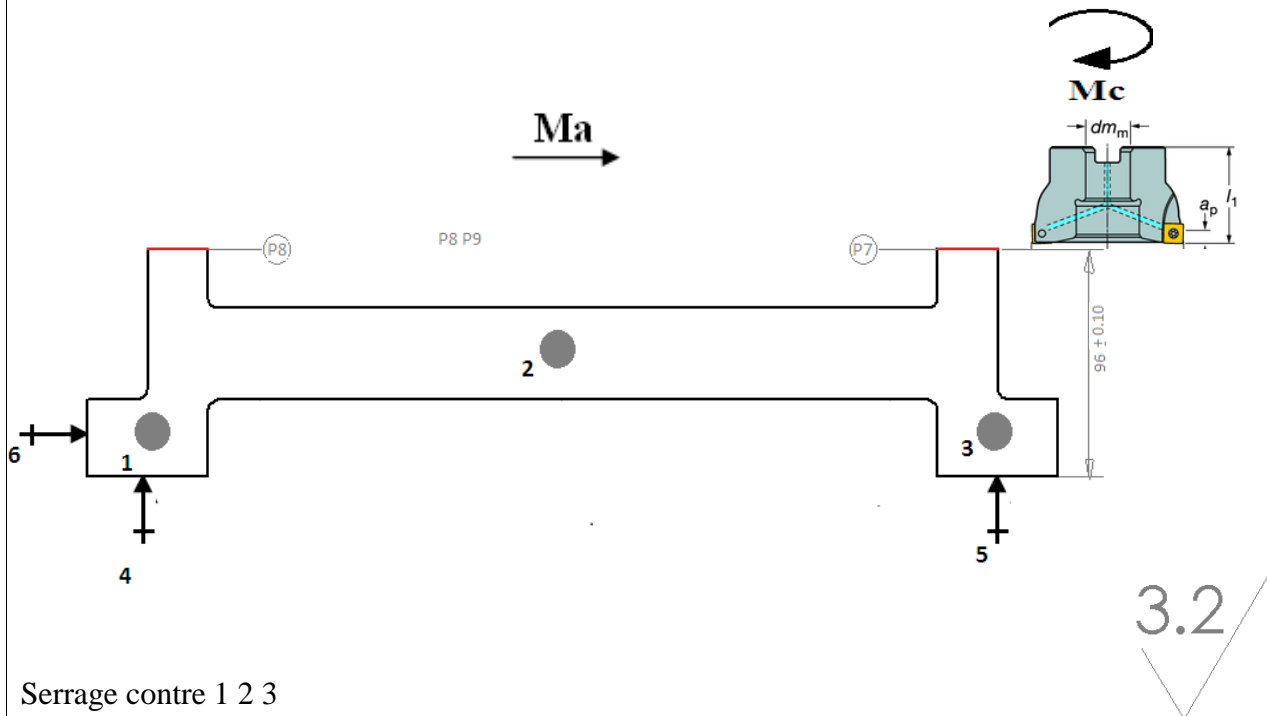
OPERATIONS	OUTILS	Vc	f/fz	N	ap
330 : fraisage de P6	Montage sur étau Fraise 2 taille à plaquette carbure métallique Ø80 + Pied a coulisse + Règle	120	0.2	557.32	2
331 : P6 E 332 : P6 F Cm = 405 ± 0.1		140	0.05	477.7	0.5

CONTRAT DE	ENSEMBLE: Enrouleuse de tôles	DATE:
-------------------	-------------------------------	-------

PHASE PREVISIONNEL PHASE N° : 300 Sous phase : 340	PIECE:SUPPORT		4/4
	MATIERE: A37		
NOM:	PROGRAMME: Unitaire		

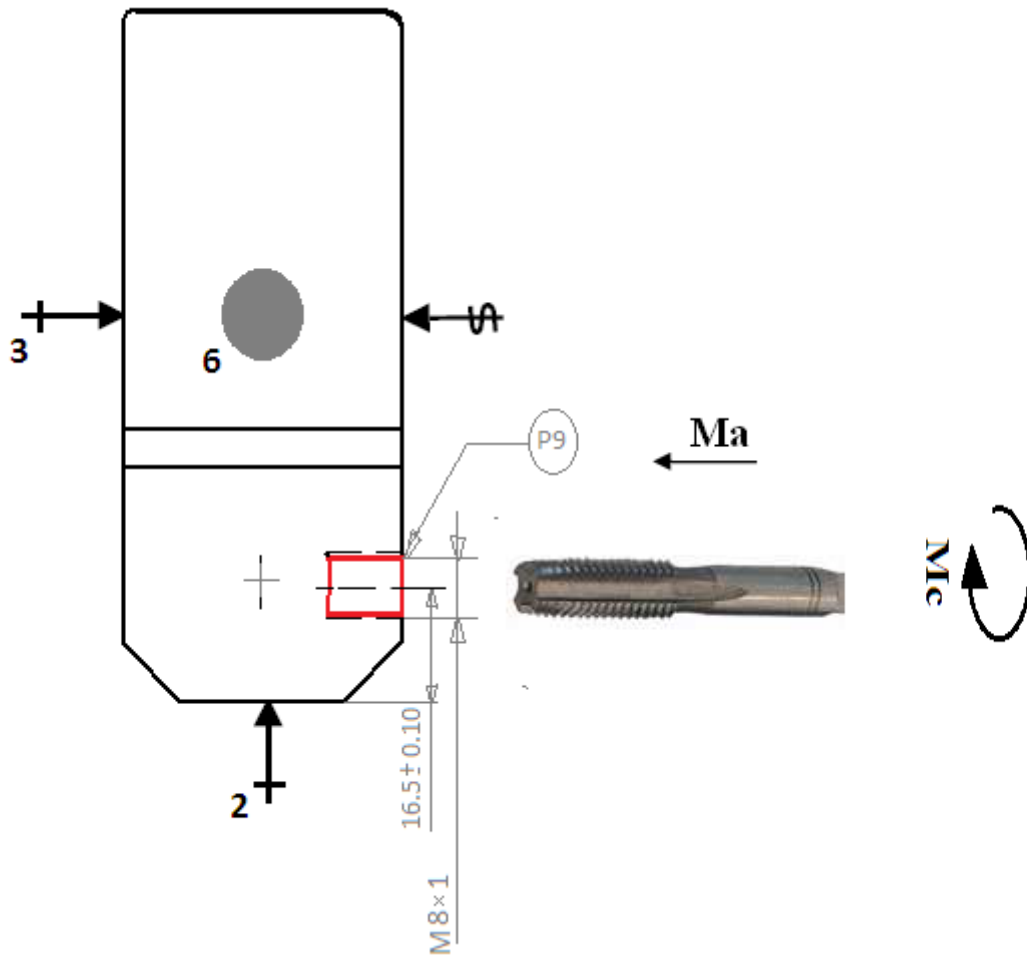
DESIGNATION: FRAISAGE

MACHINE: FRAISEUSE VERTICALE



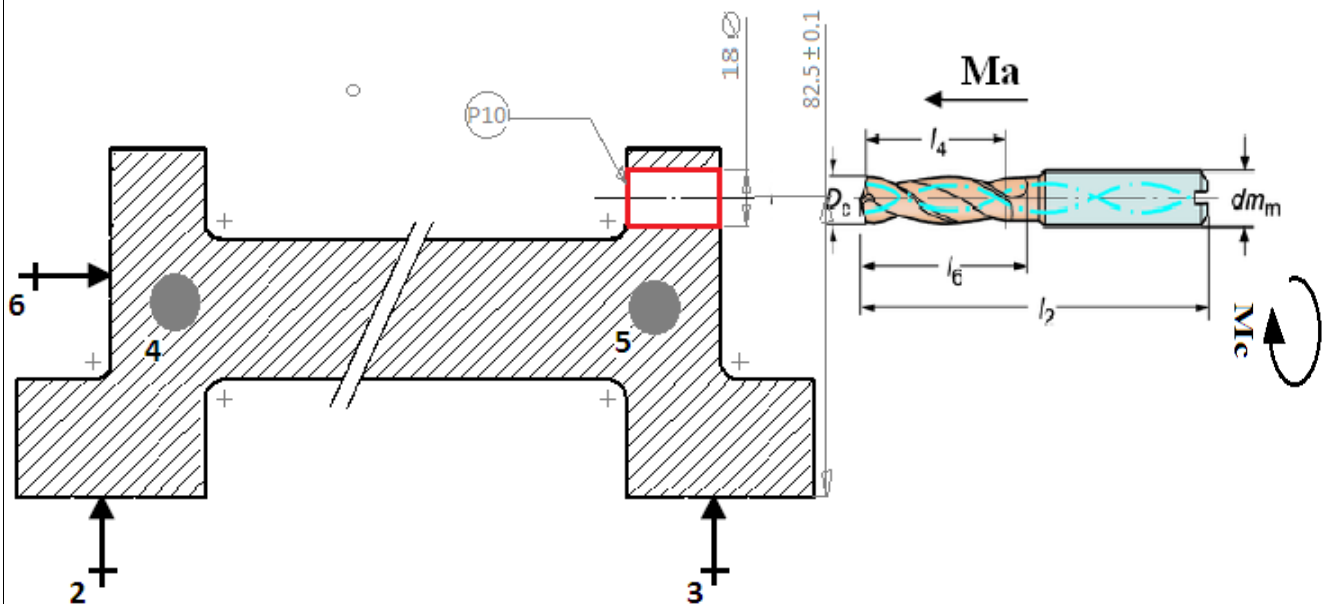
OPERATIONS	OUTILS	Vc	f/fz	N	ap
340 : fraisage de P7 . P8	Montage sur étau Fraise 2 taille à plaquette carbure métallique Ø80 + Pied a coulisse + Règle	120	0.2	557.32	2
341 : P7 E . P7 F 342 : P8 E . P8 F		140	0.05	477.7	0.5
Cm = 96 ± 0.1					

CONTRAT DE PHASE PREVISIONNEL PHASE N° :400 Sous phase : 410	ENSEMBLE: Enrouleuse de tôles	DATE:	
	PIECE:SUPPORT		1/1
	MATIERE: A37		
NOM:	PROGRAMME: Unitaire		
DESIGNATION: taraudage			
MACHINE: FRAISEUSE VERTICALE			



OPERATIONS	OUTILS	Vc	f/fz	N	ap
400 : taraudage 410 : Taraudage de P9 Co = M8x1 Ca = 16 .5 ± 0.1	Montage sur étau Forêt à centrer Forêt Ø 6 mm Taraudage M8x1	13	0.02	690.02	0.5

CONTRAT DE PHASE PREVISIONNEL PHASE N° : 500 Sous phase : 510	ENSEMBLE: Enrouleuse de tôles	DATE:	
	PIECE:SUPPORT		1/2
	MATIERE: A37		
NOM:	PROGRAMME: Unitaire		
DESIGNATION: perçage			
MACHINE: Perceuse a colon			

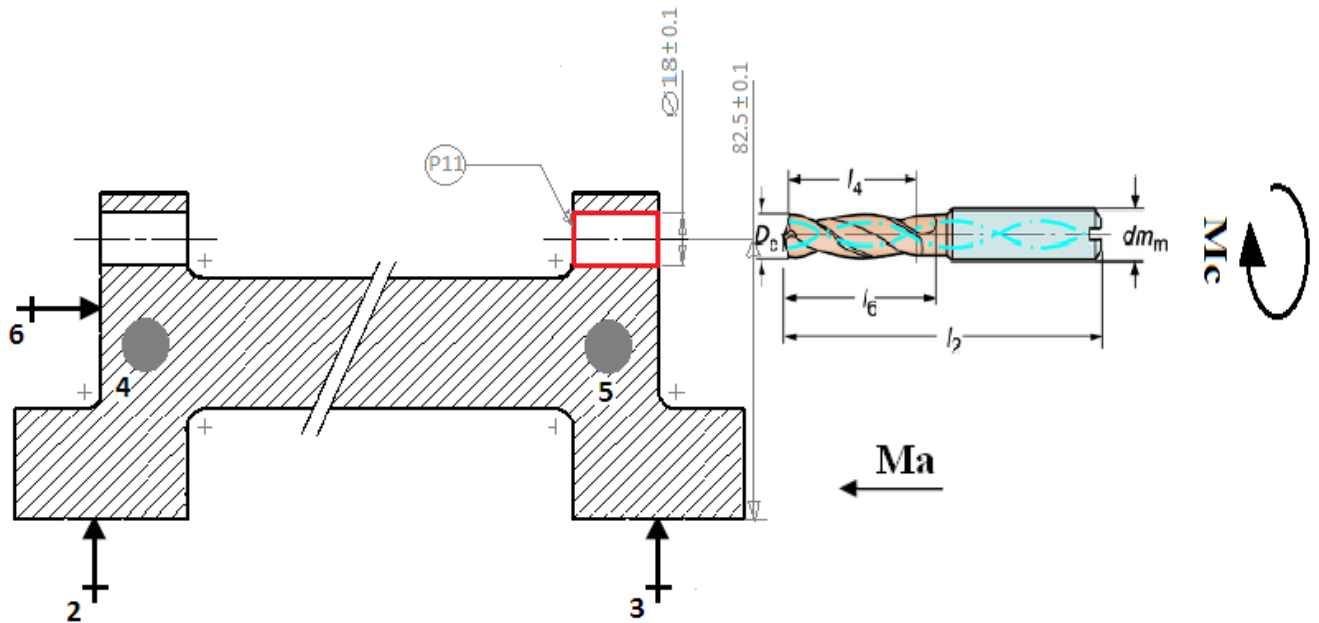


OPERATIONS	OUTILS	Vc	f/fz	N	ap
500 : Perçage	Montage sur étau	70	0.02	1592.35	0.75
510 : Perçage de P10 F Ø 18	Forêt à centrer Forêt Ø 10 mm Forêt Ø 14 mm Forêt Ø 18 mm	70	0.02	1196.17	0.75
Co = Ø 18 ± 0.1					
Ca = 82.5 ± 0.1					

CONTRAT DE PHASE PREVISIONNEL PHASE N° : 500 Sous phase : 520	ENSEMBLE: Enrouleuse de tôles	DATE:	
	PIECE:SUPPORT		2/2
	MATIERE: A37		
NOM:	PROGRAMME: Unitaire		

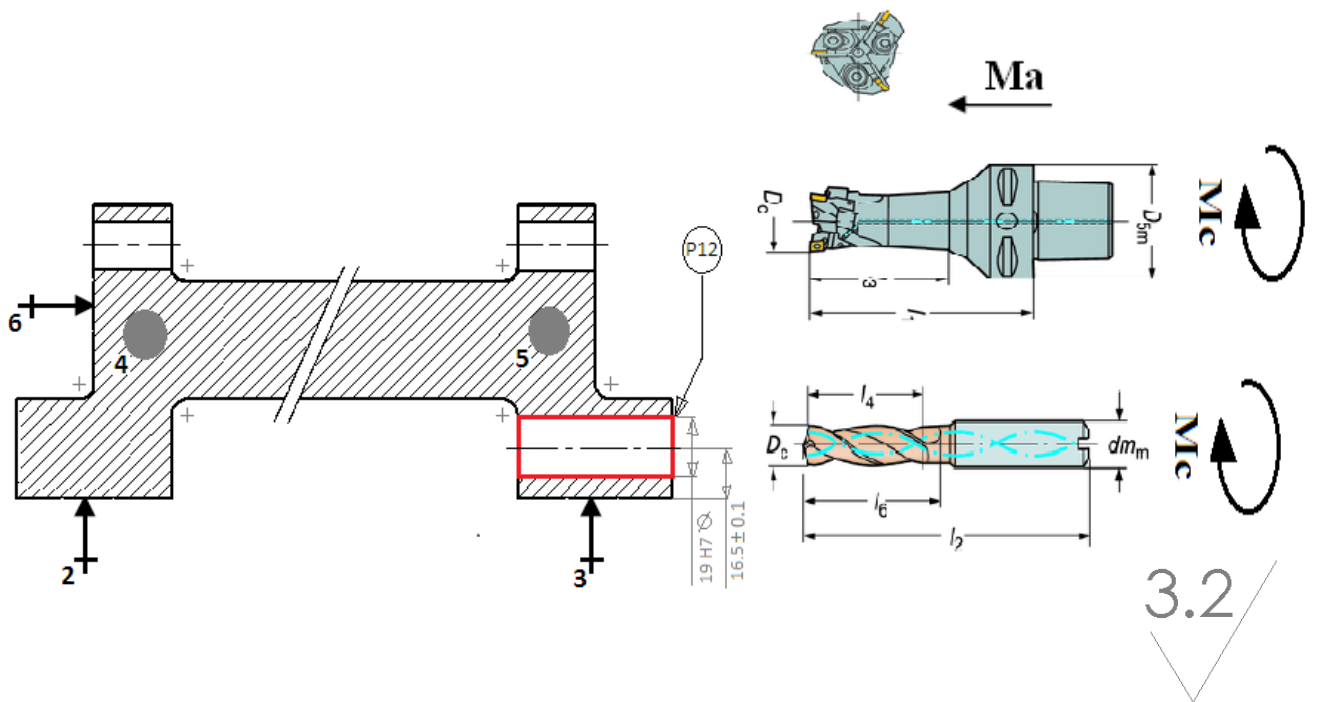
DESIGNATION: Perçage

MACHINE: Perceuse a colon



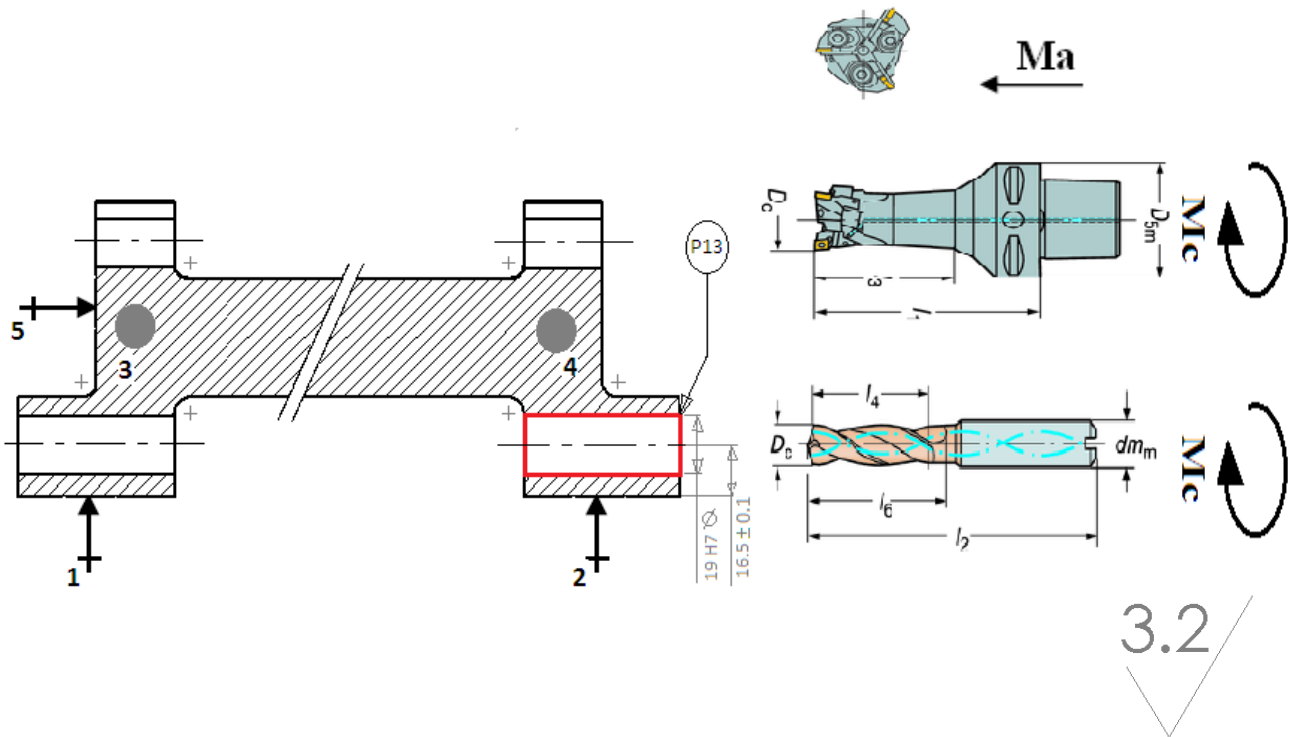
OPERATIONS	OUTILS	Vc	f/fz	N	ap
Perçage	Montage sur étau				
	Forêt à centrer	120	0.2	557.32	2
	Forêt Ø 10 mm				
	Forêt Ø 14 mm				
520 : Perçage de P11 F Ø 18	Forêt Ø 18 mm	140	0.05	477.7	0.5
Co = Ø 18 ± 0.1					
Ca = 82.5 ± 0.1					

CONTRAT DE PHASE PREVISIONNEL PHASE N° : 600 Sous phase : 610	ENSEMBLE: Enrouleuse de tôles	DATE:	
	PIECE:SUPPORT		1/2
	MATIERE: A37		
NOM:	PROGRAMME: Unitaire		
DESIGNATION: Perçage et Alésage			
MACHINE: Perceuse a colon			



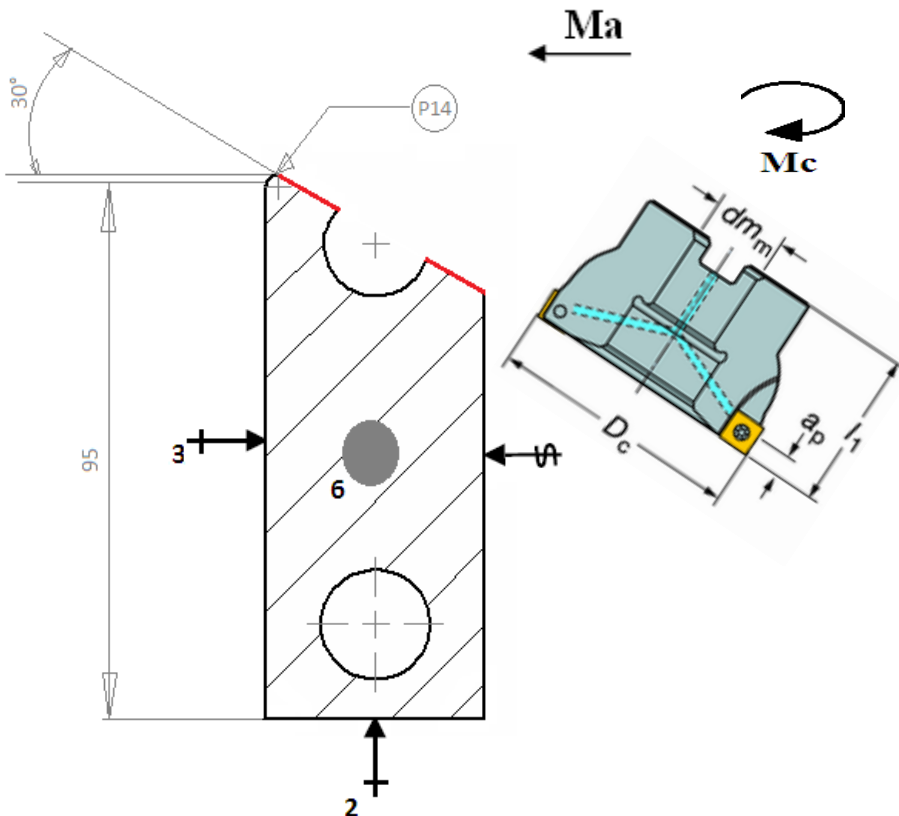
OPERATIONS	OUTILS	Vc	f/fz	N	ap
610 : perçage de P12					
611 :Perçage Ø 18.5 de p12 F	Montage sur étau	70	0.02	1592.35	0.75
Cm = 16.5 ± 0.1	Foret à Ø 10 mm				
Co = 18.5	Foret Ø 14 mm	70	0.02	1196.17	0.75
	Foret Ø 18.5 mm				
612 : Alésage de P12	Alésoir Ø 19 mm	21	0.02	351.99	0.75
613 : alésage 19H7 de P12	Calibre 19H7				
Cm = 16.5 ± 0.1	+ Pied a coulisse				
Co = 19H7					

CONTRAT DE PHASE PREVISIONNEL PHASE N° :600 Sous phase :620	ENSEMBLE: Enrouleuse de tôles	DATE:	
	PIECE:SUPPORT		2/2
	MATIERE: A37		
NOM:	PROGRAMME: Unitaire		
DESIGNATION: Perçage et Alésage			
MACHINE: Perceuse a colon			



OPERATIONS	OUTILS	Vc	f/fz	N	ap
620 : perçage de P13 621 :Perçage Ø 18.5 de p13 F	Montage sur étau Foret à Ø 10 mm Foret Ø 14 mm Foret Ø 18.5 mm	70 70	0.02 0.02	1592.35 1196.17	0.75 0.75
Cm = 16.5 ± 0.1 Co = 18.5					
622 : Alésage de P13 623 : alésage 19H7 de P13	Alésoir Ø 19 mm Calibre 19H7 + Pied a coulisse	21	0.02	351.99	0.75
Cm = 16.5 ± 0.1 Co = 19H7					

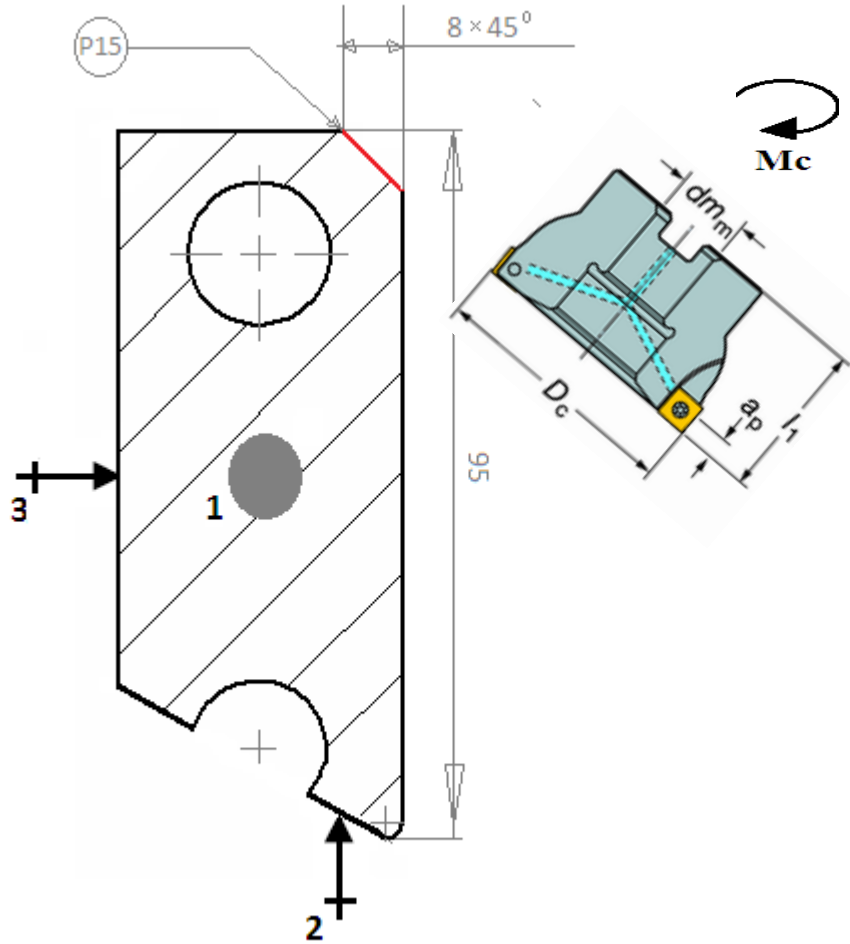
CONTRAT DE PHASE	ENSEMBLE: Enrouleuse de tôles	DATE:	
PREVISIONNEL PHASE N° : 700 Sous phase : 710	PIECE:SUPPORT		1/3
	MATIERE: A37		
NOM:	PROGRAMME: Unitaire		
DESIGNATION: FRAISAGE			
MACHINE: FRAISEUSE VERTICALE			



3.2

OPERATIONS	OUTILS	Vc	f/fz	N	ap
700 : fraisage	Montage sur étai				
710 : fraisage de P14	Fraise 2 tailles à plaquette carbure	120	0.2	557.32	2
711 : p14 E					
712 : P14 F					
Cm = 95 x30°	métallique Ø80 + Pied a coulisse + Règle	140	0.05	477.7	0.5

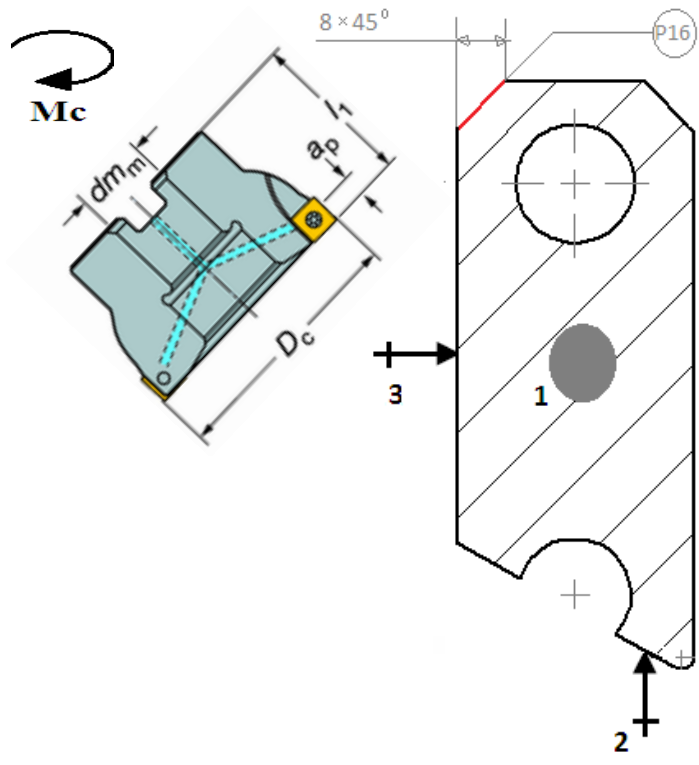
CONTRAT DE PHASE PREVISIONNEL PHASE N° :700 Sous phase :720	ENSEMBLE: Enrouleuse de tôles	DATE:	
	PIECE:SUPPORT	2/3	
	MATIERE: A37		
NOM:	PROGRAMME: Unitaire		
DESIGNATION: chanfrein			
MACHINE: FRAISEUSE VERTICALE			



3.2

OPERATIONS	OUTILS	Vc	f/fz	N	ap
720 : chanfrein de p15 $C_m = 8 \times 45^\circ$	Montage sur étau				
	Fraise 2 taille à plaquette carbure métallique Ø80	120	0.2	557.32	2
	+ Pied a coulisse	140	0.05	477.7	0.5
	+ Règle				

CONTRAT DE PHASE PREVISIONNEL PHASE N° : 700 Sous phase : 730	ENSEMBLE: Enrouleuse de tôles	DATE:	
	PIECE:SUPPORT		3/3
	MATIERE: A37		
NOM:	PROGRAMME: Unitaire		
DESIGNATION: chanfrein			
MACHINE: FRAISEUSE VERTICALE			



OPERATIONS	OUTILS	Vc	f/fz	N	ap
730 : chanfrein de p16 $C_m = 8 \times 45^\circ$	Montage sur étau				
	Fraise 2 taille à plaquette carbure métallique Ø80	120	0.2	557.32	2
	+ Pied a coulisse	140	0.05	477.7	0.5
	+ Règle				

V.1. Introduction

Dans cette partie nous nous sommes proposé de réaliser des essais de fraisage sur des pièces en Acier C45 trempé. La fraise que nous avons employé est une fraise à surfacer et rainurer à plaquettes rapportées en carbure revêtu. Le but de ces essais est d'étudier l'influence des paramètres du régime de fraisage sur la rugosité Ra, Rz, Rt de la surface usinée.

V.2. Equipements utilisés pour les essais

- **Machine-outil employée**

La machine outil employée est une fraiseuse verticale modèle 6H11 d'une puissance de 5KW.

Tableau 1. Vitesses de rotation de la fraiseuse 6H11



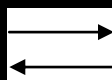


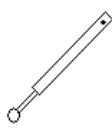

	65	80	100	125	160	210	225	300
	380	490	590	725	945	1225	1500	1800

Tableau 2. Avances

La table porte pièce			
	35	28	14
	45	35	18
	55	40	20
	65	60	30
	85	70	35
	115	90	45
	135	110	55
	170	130	65
	210	160	80
	270	210	105
	330	260	130
	400	310	155
	530	410	205
	690	535	268
	835	650	325
	1020	790	390

- **Outil de coupe**

Fraise à plaquettes rapportée en carbure métallique



Figure V. 1 :. Outil employé



Figure V.2. Fraiseuse avec pièce sur étai



Figure V.3 Rugosimètre modèle M SJ 300



Figure V.4 : Pièce à usiner (épreuve)

V.3. PLAN D'EXPERIENCE

N°	Vc m/min	Fz mm/d	Ap mm	N Tr/min	A mm/min
1	60	0.01	0.25	725	28
2	60	0.05	0.25	725	110
3	60	0.1	0.25	725	210
4	100	0.01	0.25	1225	35
5	100	0.05	0.25	1225	160
6	100	0.1	0.25	1225	410
7	140	0.01	0.25	1800	60
8	140	0.05	0.25	1800	260
9	140	0.1	0.25	1800	535
10	60	0.01	0.5	725	28
11	60	0.05	0.5	725	110
12	60	0.1	0.5	725	210
13	100	0.01	0.5	1225	35
14	100	0.05	0.5	1225	160
15	100	0.1	0.5	1225	410
16	140	0.01	0.5	1800	60
17	140	0.05	0.5	1800	260
18	140	0.1	0.5	1800	535
19	60	0.01	0.75	725	28
20	60	0.05	0.75	725	110
21	60	0.1	0.75	725	210
22	100	0.01	0.75	1225	35
23	100	0.05	0.75	1225	160
24	100	0.1	0.75	1225	410
25	140	0.01	0.75	1800	60
26	140	0.05	0.75	1800	260
27	140	0.1	0.75	1800	535

Tableau 1 : Plan 27 essais FRAISE D=25mm z=3
CC45 TREMPE

V.4. Résultats des essais de la rugosité :

N°	Vc m/min	Fz mm/d	Ap mm	N Tr/min	A mm/min	Ra μm	Rz μm	Rt μm
1	60	0.01	0.25	725	28	0.37	1.88	2.32
2	60	0.05	0.25	725	110	0.53	2.47	3.03
3	60	0.1	0.25	725	210	0.69	3.19	4.03
4	100	0.01	0.25	1225	35	0.30	1.75	2.31
5	100	0.05	0.25	1225	160	0.47	2.51	3.13
6	100	0.1	0.25	1225	410	0.70	3.12	3.47
7	140	0.01	0.25	1800	60	0.62	2.85	3.69
8	140	0.05	0.25	1800	260	0.58	3.05	4.35
9	140	0.1	0.25	1800	535	0.65	3.05	3.28
10	60	0.01	0.5	725	28	0.25	1.44	1.70
11	60	0.05	0.5	725	110	0.63	2.79	3.37
12	60	0.1	0.5	725	210	1.15	5.07	6.39
13	100	0.01	0.5	1225	35	0.38	2.10	2.43
14	100	0.05	0.5	1225	160	0.49	2.80	3.52
15	100	0.1	0.5	1225	410	0.3	1.56	1.83
16	140	0.01	0.5	1800	60	0.48	2.71	3.72
17	140	0.05	0.5	1800	260	0.43	2.06	2.54
18	140	0.1	0.5	1800	535	1.03	4.21	4.77
19	60	0.01	0.75	725	28	1.56	3.22	3.53
20	60	0.05	0.75	725	110	0.94	5.5	7.06
21	60	0.1	0.75	725	210	1.97	9.36	10.11
22	100	0.01	0.75	1225	35	0.68	4.16	7.65
23	100	0.05	0.75	1225	160	0.78	5.73	7.65
24	100	0.1	0.75	1225	410	0.99	5.30	7.1
25	140	0.01	0.75	1800	60	0.44	2.50	3.72
26	140	0.05	0.75	1800	260	0.45	2.73	3.96
27	140	0.1	0.75	1800	535	1.06	4.64	5.44

Tableau 2 : Résultats des essais

V.5 Traitement et Analyse des résultats

Dans cette partie nous avons présenté les courbes montrant l'influence de l'avance par dent sur la rugosité de la surface usinée par rapport au différentes vitesses de coupe et profondeurs de passe.

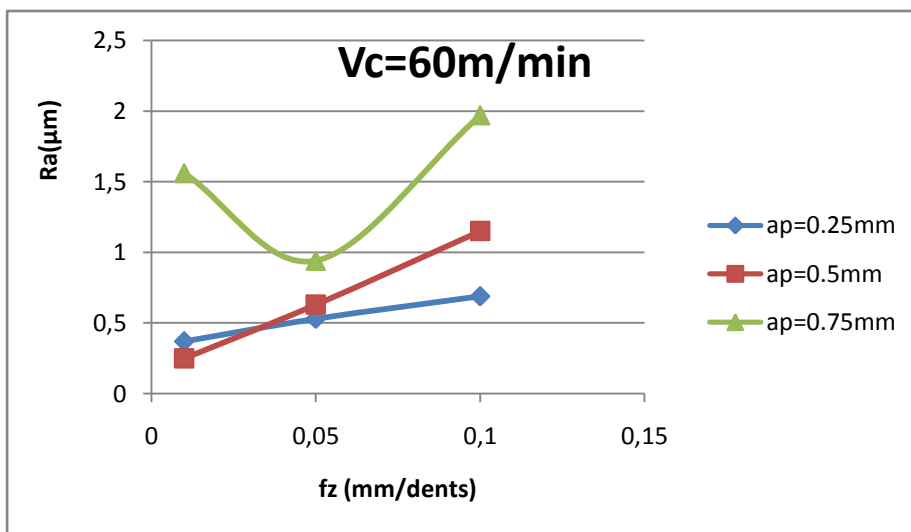


Figure V.5 : influence de la profondeur de passe sur les rugosité (Ra) en fonctions du Fz avec Vc =60

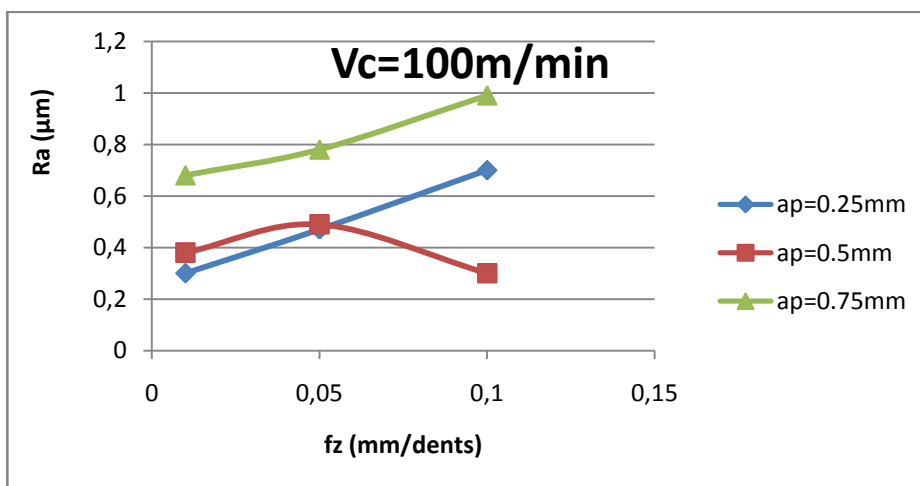


Figure V.6 : influence de la profondeur de passe sur les rugosité (Ra) en fonctions du Fz avec Vc =100

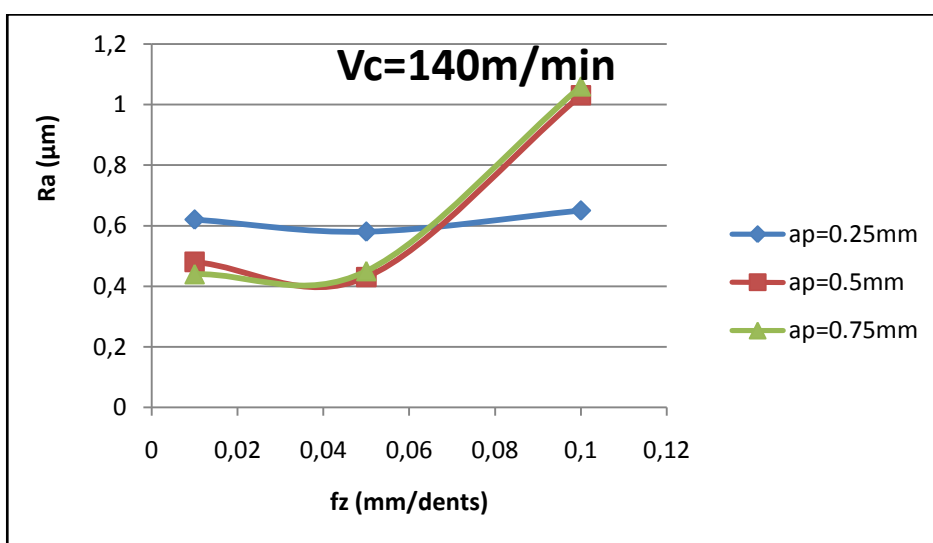


Figure V.7 : influence de la profondeur de passe sur les rugosité (Ra) en fonctions du Fz avec Vc =140

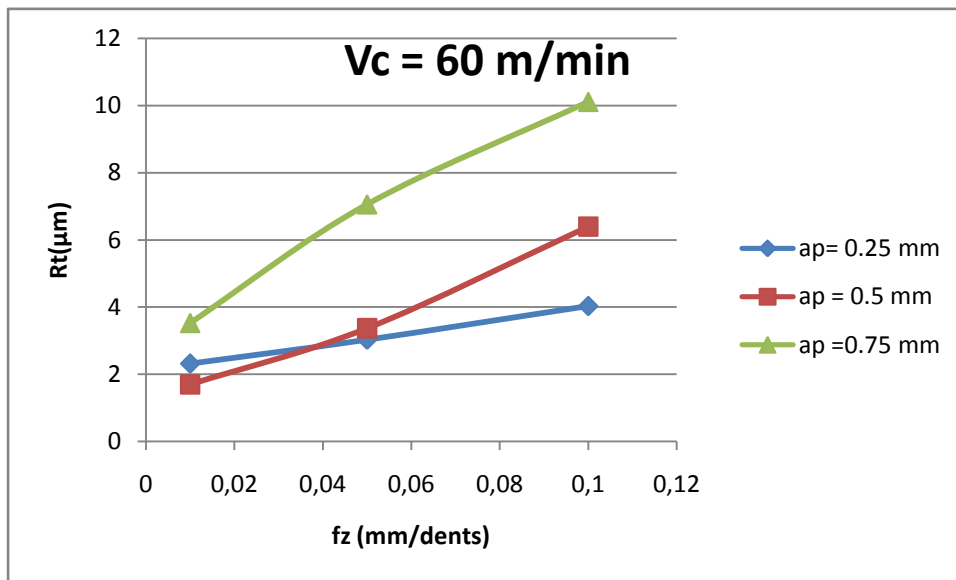


Figure V.8 : influence de la profondeur de passe sur les rugosité (Rt) en fonctions du Fz avec Vc =60

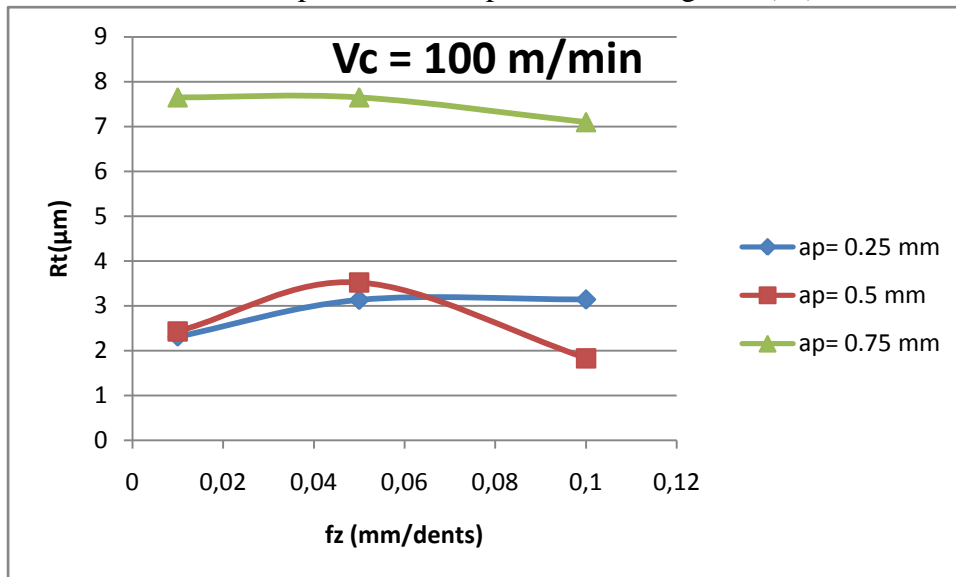


Figure V.9: influence de la profondeur de passe sur les rugosité (Rt) en fonctions du Fz avec Vc =100

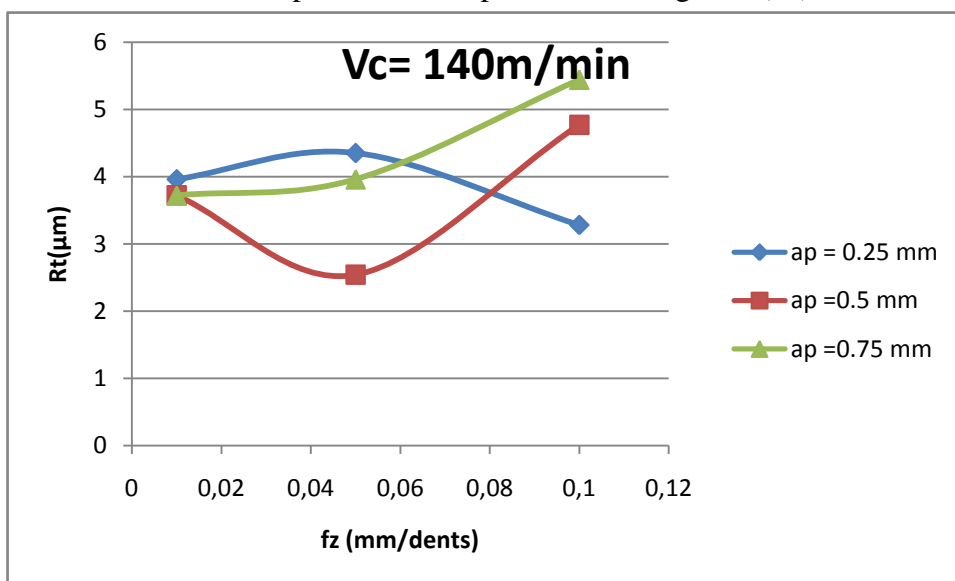


Figure V.10 : influence de la profondeur de passe sur les rugosité (Rt) en fonctions du Fz avec Vc =140

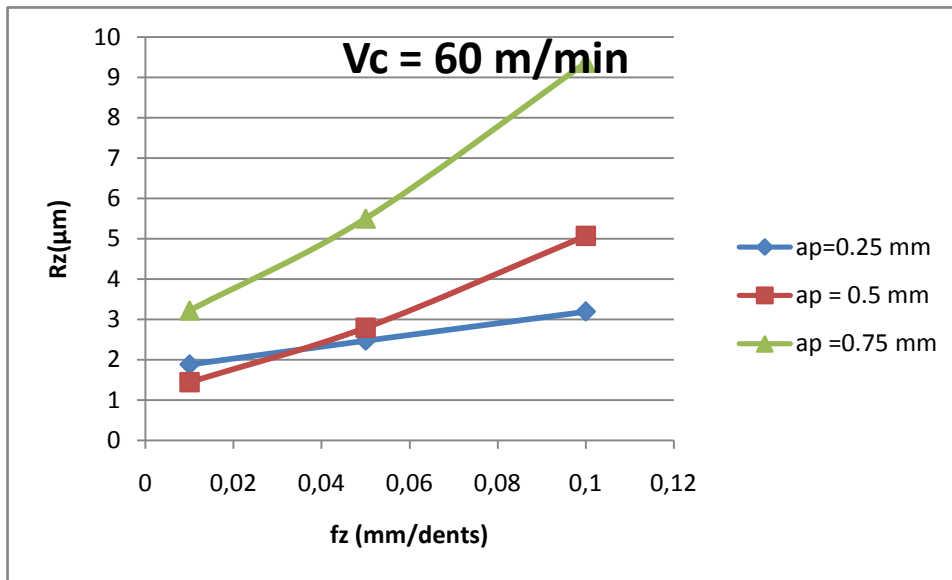


Figure V.11 : influence de la profondeur de passe sur les rugosité (Rz) en fonctions du Fz avec Vc =60

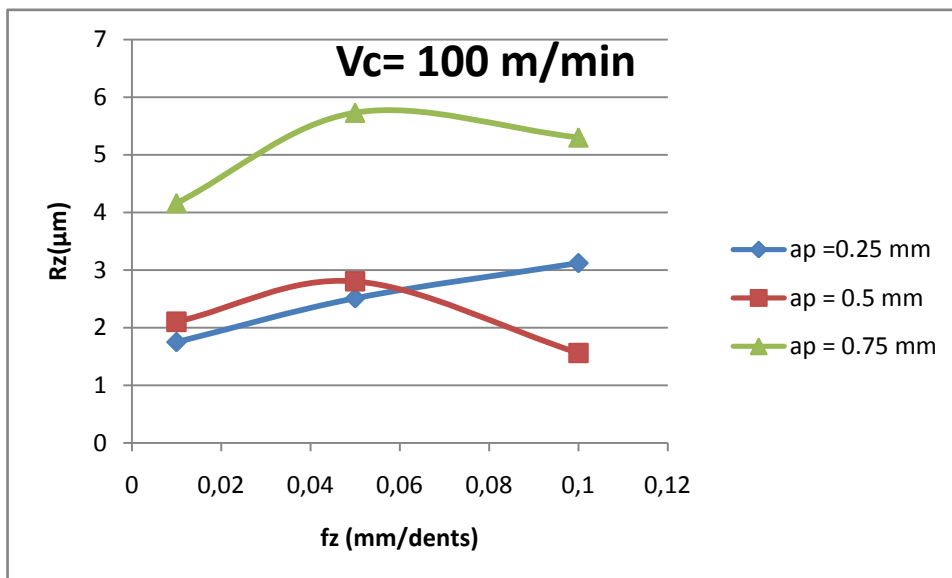


Figure V.12 : influence de la profondeur de passe sur les rugosité (Rz) en fonctions du Fz avec Vc =100

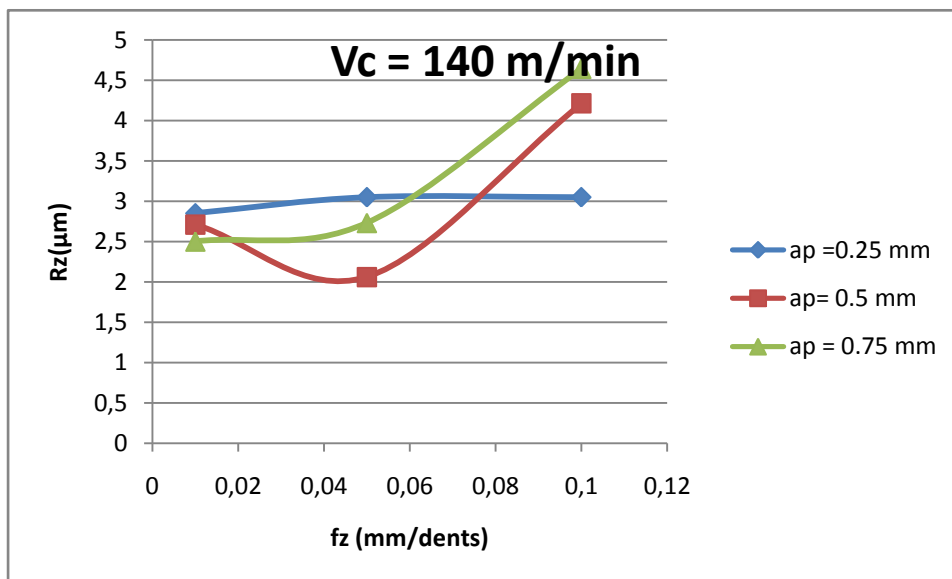


figure V.13 : influence de la profondeur de passe sur les rugosité (Rz) en fonctions du Fz avec Vc =140

L'analyse des résultats obtenus ainsi que les courbes représentant l'influence des paramètres du régime de coupe, nous permet d'affirmer qu'avec l'augmentation de l'avance par dent la valeur de la rugosité augmente ce qui veut dire que l'état de surface se dégrade.

La vitesse de coupe lorsqu'elle augmente améliore la rugosité de la surface, mais avec le dent l'usure due aux fortes vitesses réduit la qualité de la surface.

La profondeur de passe influe faiblement sur la rugosité.

V.6. Conclusion :

Pour assurer un usinage correct sur le plan état de surface, précision et durée de vie de l'outil de coupe, il faut bien choisir les conditions de coupe.

Cette expérience nous permet de mieux voir quels sont les paramètres qui influent le plus sur le processus de coupe.

Notre étude nous a permis de montrer que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sont les paramètres les plus importants qui agissent directement sur la qualité des pièces à usiner.

ANNEXE1 :**Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes (en m/min)**

Nuance ISO	Matériaux à usiner	Fraisage				Fraisage filetage
		Acier Rapide		Carbure		Carbure
		0.03 à 0.1	0.1 à 0.2	0.05 à 0.2	0.2 à 0.3	f = pas du filet
	Avance f en mm/dent/tour					
P	Acier Non Allié	50	40	140	120	150
	Acier Faiblement Allié	30	25	100	80	130
	Acier Fortement Allié	20	15	80	70	100
	Acier Moulé Faiblement Allié	25	20	90	80	120
M	Acier inoxydable	20	15	100	90	150
K	Fonte lamellaire (EN-GJL...)	35	30	100	90	120
	Fonte Modulaire (EN-GJM...)	30	25	80	70	100
	Fonte Sphéroïdale (EN-GJS...)	40	35	100	90	120
K-N	Alliages d'aluminium de faible dureté sans silicium (AW 2030 ...)	250	200	500	400	300
	Alliages d'aluminium durs sans silicium ou %Si moyen (AW2017, AW 6060 ...)	120	80	300	200	250
	Alliages d'aluminium à haute teneur en silicium > 12%	80	40	120	80	100
Vitesse de coupe Vc en m/min						

ANNEXE 2 :***Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes***

Nuance ISO	Matériaux à usiner	Perçage		
		Acier Rapide	Acier Rapide Revêtu	Carbure
P	Acier Non Allié	30	45	70
	Acier Faiblement Allié	20	40	60
	Acier Fortement Allié	15	35	40
	Acier Moulé Faiblement Allié	10	30	70
M	Acier inoxydable	12	20	40
K	Fonte lamellaire (EN-GJL...)	25	50	80
	Fonte Modulaire (EN-GJM...)	15	30	80
	Fonte Sphéroïdales (EN-GJS...)	25	50	80
K-N	Alliages d'aluminium de faible dureté sans silicium (AW 2030 ...)	60	90	100
	Alliages d'aluminium durs sans silicium ou %Si moyen (AW2017, AW 6060 ...)	60	90	100
	Alliages d'aluminium à haute teneur en silicium > 12%	40	60	100
		Vitesse de coupe Vc en m/min		

ANNEXE 3 :***Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes (en m/min)***

Nuance ISO	Matériaux à usiner	Taraudage
		Acier Rapide
P	Acier Non Allié	13
	Acier Faiblement Allié	10
	Acier Fortement Allié	5
	Acier Moulé Faiblement Allié	7
M	Acier inoxydable	5
K	Fonte lamellaire (EN-GJL...)	10
	Fonte Modulaire (EN-GJM...)	8
	Fonte Sphéroïdales (EN-GJS...)	12
K-N	Alliages d'aluminium de faible dureté sans silicium (AW 2030 ...)	18
	Alliages d'aluminium durs sans silicium ou %Si moyen (AW2017, AW 6060 ...)	13
	Alliages d'aluminium à haute teneur en silicium > 12%	10
		Vitesse de coupe Vc en m/min

ANNEXE4 :***Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes (en m/min)***

Nuance ISO	Matériaux à usiner	Alésage		
		Acier Rapide	Acier Rapide Revêtu	Carbure
P	Acier Non Allié	12	14	21
	Acier Faiblement Allié	9	12	18
	Acier Fortement Allié	6	11	12
	Acier Moulé Faiblement Allié	5	9	21
M	Acier inoxydable	4	6	12
K	Fonte lamellaire (EN-GJL...)	8	15	24
	Fonte Modulaire (EN-GJM...)	5	9	24
	Fonte Sphéroïdale (EN-GJS...)	8	15	24
K-N	Alliages d'aluminium de faible dureté sans silicium (AW 2030 ...)	18	27	30
	Alliages d'aluminium durs sans silicium ou %Si moyen (AW2017, AW 6060 ...)	18	27	30
	Alliages d'aluminium à haute teneur en silicium > 12%	12	18	30
		Vitesse de coupe Vc en m/min		

ANNEXE 5 :

Procédés de fabrication et rugosité de surfaces réalisées

Procédé d'obtention	Rugosité moyenne Arithmétique : Ra											
	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.025
Moulage en sable	■	■	■	■								
Moulage en cire perdue				■	■	■	■	■				
Moulage en moule métallique				■	■	■	■	■				
Moulage sous pression				■	■	■	■	■	■			
Matricage à chaud		■	■	■	■	■	■	■	■			
Fraisage carbure					■	■	■	■	■	■		
Tournage ébauche	■	■	■	■	■							
Tournage finition				■	■	■	■	■	■			
Tournage outil diamant carbure					■	■	■	■	■	■		
Perçage au foret			■	■	■	■	■	■				
Alésage à l'outil				■	■	■	■	■	■			
Alésage à l'alésoir				■	■	■	■	■	■	■		
Alésage outil diamant carbure					■	■	■	■	■	■		
Brochage				■	■	■	■	■	■	■		
Rectification de production					■	■	■	■	■	■		
Rectification de précision						■	■	■	■	■	■	
Rodage au rodoir								■	■	■	■	■
Polissage mécanique								■	■	■	■	■
Superfinition										■	■	■
Galetage								■	■	■	■	■