وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA

جامعة باجي مختارعنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

# MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

## INTITULE

# L'influence des paramètres de coupe sur l'état de surface lors de l'usinage de l'acier XC48

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : FABRICATION MECANIQUE ET PRODUCTIQUE

PRESENTE PAR : BOUGOFFA RAMEZ MED LAMINE

DIRECTEUR DU MEMOIRE: Dr. NEHAL ABD ELAZIZ

DEVANT LE JURY

| | | |
|---|---|---|
| PRESIDENT: | Dr. BOURENANE R. | Université Badji Mokhtar Annaba |
| EXAMINATEURS: | Dr. MOKAS N. | Université Badji Mokhtar Annaba |
| | Dr. YOUNES R. | Université Badji Mokhtar Annaba |

Année: 2017/2018

# Remerciements

*Mon remerciement s'adresse en premier lieu à ALLAH le tout puissant pour la volante, la santé et la patience qu'il m'a donnée durant ces longues années.*

*Je tiens aussi à remercier mon encadreur Dr. NEHAL ABDELAZZIZE qui m'a apporté une aide précieuse, je lui exprime ma gratitude pour sa grande disponibilité, ainsi que pour sa compréhension et les encouragements qu'il m'a apportés.*

*Je remercie tout particulièrement Monsieur Dr. BOURENANE R, Maitre de conférences au Département Génie Mécanique et président du jury.*

*Mes vives remerciements vont à Monsieur Dr. YOUNES R, Maitre de conférence au Département Génie Mécanique.*

*Je tiens à exprimer mes remerciements à Monsieur Dr. MOKAS N, Maitre de conférence au Département Génie Mécanique.*

*Mes remerciements aussi s'adressent à tous Les enseignants du Département de Génie Mécanique.*

*En fin Mes remerciements vont à ma famille et mes amis pour son soutien moral et financière durant cette formation.*

# Dédicace

- Je dédie ce modeste travail à :

- Mon père et ma mère.
- Ma sœur.
- Toute ma famille.
- Mes amis et mes collègues d'étude.

A tout ceux qui ont été à mes coté dans les mome

# SOMMAIRE

*Introduction……01*

## *Chapitre I*

## *Etude Bibliographique*

*I. Introduction……02*

*I.1 Généralité sur L'usinage ……02*

*I.2 situation de la pièce sur la machine ……02*

*I.3 Les paramètres de coupe ……03*

*I .3.Généralité ……03*

*I .3.2 La notion de copeau minimum ……04*

*I .3.3 Les critères de choix ……04*

*I.4.L'outil de coupe ……06*

*I .4.1 Géométrie des outils de coupe ……07*

*I .4.2Les angles de coupe ……07*

*I.5.Matériaux utilisés pour les outils ……09*

*I .6 Choix du matériau de l'outil de coupe ……11*

*I .7Revêtements ……11*

*I .8 Machine-outil ……12*

*I .8.1 Les types de machine –outil ……12*

*I .8.2Le type de commande ……13*

*I .8.3 Machine- outil à commande numérique……14*

*I .9 le tournage……14*

*I .9.1 Définition……14*

*I .9.2Machine-outil ……16*

*I .9.3 Classification des machines de tour……17*

*I .9.4 Régime de coupe en tournage ……18*

*I .9.5 Les définitions des principales opérations de tournage …….23*

# ***Chapitre II***

# ***La Rugosité de Surface***

*II. Introduction …….32*

*II .1. Généralités sur les états de surface ……33*

*II .2 Rugosité :……33*

*II .3 Les défauts d'états de surface……34*

*II .3.1 Ordre 1 : défauts de forme : ordre 1……35*

*II .3.2 Ordre 2 : défauts macrographiques, ondulation :……36*

*II .3.3 Ordre 3 : défauts micrographiques, rugosité :……37*

*II .3.4 Ordre 4 : arrachement de matière :……39*

*II.4 Différents types de lignes :……40*

*II .4.1 Longueur de base, d'évaluation :……40*

*II .4.2 Ligne de référence : ……41*

*II .4.3 La ligne enveloppe supérieure ……41*

*II.4.4 La ligne enveloppe inférieure ……41*

*II .5 Paramètres de rugosité uni-dimensionnelle :……41*

*II.5.1 Paramètres d'amplitude de rugosité : ……42*

*II.5.2 Principaux paramètres de la rugosité : ……46*

*II .5.3 Paramètres liés aux motifs et à la ligne enveloppe :……47*

*II .5.4 Paramètres liés à la ligne moyenne : ……48*

*II .6 Les spécifications normalisées ……50*

*II.7.Mesure de la rugosité : ……51*

*II .8.Généralité sur les techniques d'amélioration des états de surface……52*

*II .8.1 .La Rectification……52*

*II.8.2 Principe de La Rectification : ……52*

*II.8.3 Avantage de la rectification……53*

*II .8.4. Superfinition :……53*

*II .8.5. Galetage : ……54*

*II .8.6.Rodage : ……54*

*II .9.Avantages de la lubrification……56*

*II.9.1 Fonctions assurées par les fluides d'usinage (lubrification)……56*

*II.9.2 Maintien en température……56*

*II.9.3 Lubrification……56*

*II .9.4 Évacuation des copeaux……56*

*II.10 Composition des fluides d'usinage……56*

*II.10.1 huiles entières……56*

*II.10.2 fluides de type émulsion……57*

*II.11.3 fluides de type micro-émulsion :……57*

*II.11.4 fluides synthétiques :……57*

# ***Chapitre III***

# ***Partie Expérimentale***

*III.1. expériences et machines-outils utilisés :……58*

*III.2 Mâtereaux utilisé :……58*

*III.2.1. analyse chimique moyenne : ……58*

*III 2.2.Propriétés physique et mécanique :……58*

*III.2.3.Caractéristiques :……58*

*III.3. machine-outil utilisés :……59*

*III.4.Outil de coupe utilisé:……60*

*III 5.Régime de coupe :……60*

*III 6.Présentation de l'éprouvette :……60*

*III.7.Rugosimètre utilisé :……..62*

*III.8.Résultats expérimentaux ……..……64*

*III 8.1La vitesse de coupe Vc :……....64*

*III.8.2.Routage d'usinage …….64*

*III .8.3.Discussions : …….71*

*III.9. Conclusion :…….72*

# ***Chapitre I : Etude Bibliographique***

***Figure I.1*** *système bouclé [1] ……..03*

***Figure I.2*** *les fonctions d'assurions de situation d'usinage [1] ……04*

***Figure I.3*** *les mouvements relatif entre la pièce et l'outil [2] ……..04*

***Figure I.4*** *phénomène de coupe [2] ……05*

***Figure I.5.****Arêtes et parties actives d'un outil de tournage [3] …….07*

***Figure I.6.****Principaux plans de l'outil en main. [4] ……08*

***Figure I.7.*** *Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage. [2] ……09*

***Figure I.8****.Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant [4] ……12*

***Figure I.9****Fraiseuse conventionnelle [3] ……13*

***Figure I .10****Fraiseuse et tour en CN [3] ……14*

***Figure I.11****.Manivelle [3] ……14*

***Figure I.12.****Boite vitesse [3] ……15*

***Figure I.13.*** *Présentation des axes de mouvement [3] ……16*

***Figure I.14****les défirent outils de tournage [3] ……16*

***Figure I.15****Chemin d'un tour parallèle[3] ……18*

***Figure I.16****Dimensions de coupe dans le cas de tournage. [4] ……20*

***Figure I.17.****vitesse de coupe. [4] ……20*

***Figure I.18*** *Vitesse d'avance Va. [4] ……22*

***Figure I.19****. Différente types d'avance [3] ……23*

***Figure I.20****Représentation de la profondeur de passe p. [3] ……24*

***Figure I.21****Le chariotage cylindrique et conique [5] ……24*

***Figure I.22****.Dressage extérieur et intérieur [5] ……25*

***Figure I.23.****Le perçage [5] ……25*

***Figure I.24.****L'alésage cylindrique et conique[5] ……26*

***Figure I .25.****Le rainurage intérieur et extérieur [5] ……26*

***Figure I .26****.Le tronçonnage [5] ……26*

***Figure I.27**.Le filetage intérieur et extérieur[5] ……..…27*

***Figure I .28.**Les outils à charioter. Epaulement conique et épaulement droit* [5]……28

***Figure I.29.**Le dressage extérieur cylindrique et conique[5] ……28*

***Figure I.30**.Le dressage intérieur [5] ……29*

***Figure I.31**Alésage cylindrique et alésage conique[5] ……..…29*

***Figure I.32**Différents outils à charioter et dresser[5] ……30*

***Figure I.33**Divers outils à aléser et dresser[5] ……30*

***Figure I.34**Les outils à rainurer*[5]…….31

***Figure I.35**Outil à tronçonner*[5]……31

# ***Chapitre II : La Rugosité de Surface***

***Figure II.1** Profil de surface[7] ……...35*

***Figure II.2** Les types de défauts de surface [7] ……..…36*

***Figure II.3**Défauts d'ordre 1[7] ……..36*

***Figure II.4** motif d'ondulation……..37*

***Figure II.5**Profil « redressé »……..…38*

***Figure II.6** profondeur d'aplanissement de rugosité : $R_p$ ; écart moyen par rapporte à la linge moyenne de rugosité : $R_a$ [7] ……..38*

***Figure II.7** arrachement de matière*[7]……39

***Figure II.8** la ligne moyenne[7] ……..40*

***Figure II.9** la présentation de la longueur de base[7] ……40*

***Figure II.10**Ligne des moindres carrés [8] ……..41*

***Figure II.11** rugosité moyenne $R_a$ [6] ……..42*

***Figure II.12**Hauteur maximale du profil $R_t$ [6] ……...43*

***Figure II.13** Hauteur maximale moyenne $R_z$[6] ……..…44*

***figure II.15** profil total caractérisé par les critères :$W_i$,$W_{max}$,$A_W)_i$ et $R_{max}$et largeur d'entaille [7] ……..45*

***Figure II.16*** *Paramètre lies a la longueur de bas [8]* …….46

***Figure II.17*** *Paramètres liés à la longueur d'évaluation [7]* …….....48

***Figure II.18*** *Paramètres liés à la distribution d'amplitude [8]* …….....49

***Figure II.19*** *symbole graphique de l'état de surface [6]* …….....50

***Figure II.20****Exemple de symbolisation* [6]…….51

***Figure II.22****Rugosimètre[1]* …….....…53

***Figure II.23*** *opération de la Rectification [6]* …….53

***Figure II.****24opération de Superfinition [10]* …….55

***Figure II.25*** *opération de galetage [1]* …….....…56

***Figure II.25*** *liquide de coupe [11]* …….....57

# ***Chapitre III Partie Expérimentale***

***Figure III.1 :*** *Tour universel à* …….…….…59

***Figure III.2 :*** *Outil à tronçonner* …….…….…60

***Figure III.3 :*** *Outil à charioter et dresser*……..……60

***Figure III.3.****dessin de définition de la pièce*…….……61

***Figure III.4.****la pièce*…….....62

***Figure III.05.*** *Dispositif pour mesurer la rugosité*…….…63

***Figure III.06.****palpeur de rugosimétre*…….…….63

# *Liste des tableaux*

***Tableau III .1.*** *Composition chimique…….58*

***Tableau III .2.*** *Caractéristiques mécaniques moyennes (état normalisé)……58*

***Tableau III .3****. Condition d'essai 1.....65*

***Tableau III .4****. Condition d'essai 2……..65*

***Tableau III.5.*** *Tableau des valeurs de la rugosité (Ra) lors de l'usinage à sec …….66-67*

***Tableau III.6.*** *Tableau des valeurs de rugosité (Ra) relevées lors de l'usinage avec lubrification……68-69*

# *Liste des graphes*

**Graphe III .1** variation de la rugosité (Ra) en fonction de l'avance (f) lors de l'usinage à sec...……67

**Graphe III .2** variation de la rugosité (Ra) en fonction de l'avance (f) lors de l'usinage avec lubrification……....69

**Graphe III .3** variation de la rugosité (Ra) en fonction de l'avance (f) lors de l'usinage à sec et lubrification……70

## Liste des abréviations

| | | |
|---|---|---|
| Vc | Vitesse de coupe | m/min |
| N | Frequence de rotation | Tour/min |
| f | Avance | Mm/tour |
| Vf | Vitesse d`avance | Mm/min |
| ap | Profondeur de passe | Mm |
| D | Diametre | Mm |
| L | Longueur | Mm |
| R | Rayon de bec d`outil | Mm |
| Kr | Angle de direction d`arete de l`outil | Degre |
| Dureté | Durete | HRC, HB |
| Ra | Rugosite artithmetique | µm |
| Rt | Rugosite totale | µm |
| Rz | Rugosite | µm |
| Rq | Rugosite quadratique | µm |
| A | Allongement | % |
| Re | Limite elastique | MPa |
| Rm | Limite de rupture | MPa |
| α | Angle de depouille | Rd |
| B | Angle de taillant | Rd |
| Φ | Angle de cisaillement primaire | Rd |
| Γ | Angle de coupe | Rd |

# ***Introduction général***

Historiquement, la recherche sur l'usinage s'est concentrée sur deux aspects : le premier aspect concerne le développement technologique qui permet d'améliorer la productivité ainsi que la qualité des pièces finies, le deuxième aspect est la modélisation qui permet la prédiction des efforts de coupe, des champs de température et des propriétés des surfaces finies [15]. Cependant, le processus de fabrication, en particulier l'usinage, joue un rôle important sur la qualité et l'intégrité des surfaces réalisées. La complexification constante des systèmes de fabrication et la concurrence amènent les technologies d'usinage à se développer rapidement. Les machines deviennent de plus en plus rapides et puissantes dans le but d'obtenir des gains de productivité [16].

La connaissance de l'impact que peut avoir l'usinage de la surface d'un produit fini à forte valeur ajoutée est d'un intérêt primordial pour les ingénieurs et les scientifiques. Les défis principaux sont alors la prédiction du copeau formé, des évolutions de la microstructure, du comportement mécanique et du comportement en corrosion des matériaux usinés. De nombreuses études adoptant des approches numériques et expérimentales ont été réalisées dans l'objectif d'analyser la formation du copeau. Par contre, beaucoup moins d'attention a été portée sur le lien entre les conditions d'usinage appliquées et les propriétés physico-chimiques des surfaces usinées qui en dépendant (rugosité de la surface, contraintes résiduelles induites, transformation de phase, recristallisation, dureté, structures de dislocation,….) [17].

L'étude de l'influence de cette dernière, ainsi que la lubrification du contact de surface contribuent à l'amélioration des performances et la durée de vie des mécanismes. Beaucoup d'études furent entreprises pour mieux comprendre, et maitriser l'influence des paramètres de rugosité sur les systèmes mécaniques, D'où la nécessité de la caractérisation topographique des surfaces en présence, dont dépend la représentation aussi fidèle et complète du lubrifiant.

La qualité des états de surface est l'un des aspects les plus pertinents des opérations d'usinage, puisqu'elle représente la phase finale dans le cycle de production pour l'amélioration du degré de finition des surfaces et les propriétés dimensionnelles et géométriques des pièces mécaniques. Donc, il est important de se rendre compte de l'influence des différents facteurs impliqués dans le processus de la coupe afin de choisir les paramètres appropriés qui permettent d'atteindre la qualité des surfaces désirée et qui dépend de la géométrie de l'outil, des conditions de coupe et des phénomènes mise en jeu lors de la coupe [18].

Le but de ce travail est de montrer l'importance des paramètres de coupe et le finie des surfaces de pièces mécaniques, et leurs impacts sur la rugosité de surface qui en découle, et sur le fonctionnement d'un système mécanique.

# Chapitre I

# Etude Bibliographique

## *I. Introduction :*

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.

Dans ce chapitre nous présentons généralité sur le tournage, qui contient des définitions, les conditions de coupe et la géométrie d'outil en plus les paramètres techno-économiques de production (temps, coût).

## *I.1 Généralité sur L'usinage :*

L'usinage c'est l'ensemble des activités et des moyens mis en œuvre pour permettre la création de bien matériels, produire c'est transformer.

Au sens industriel, la production est définie comme étant un flux c'est –à-dire un écoulement organisé orienté, qu'il faudra gérer.

L'usinage est un ensemble d'opération de réalisation d'une pièce selon un routage d'usinage bien déterminé.

Procédé et routage d'usinage à suivre pour la réalisation d'une pièce complète.

Le Produit ce qui (ousera) fourni à l'utilisateur pour répondre au besoin de l'entreprise. Pour commercialiser un article l'entreprise emploi, l'expression < produit fini **[1]**

## *I.2 situation de la pièce sur la machine*

Les cinq éléments qui interviennent généralement dans un système d'usinage sont :

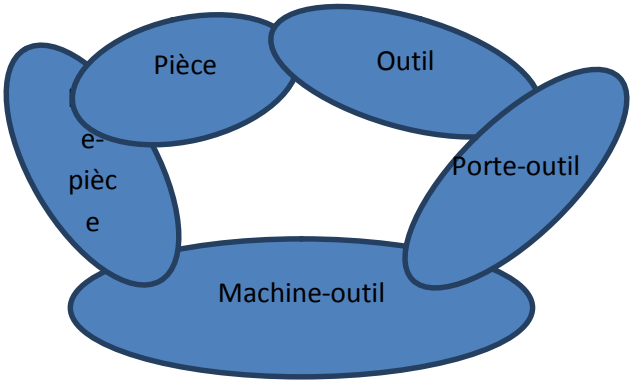



***Figure I.1*** *système bouclé [1]*

Dans toute situation d'usinage, il faut assurer deux fonctions principales :

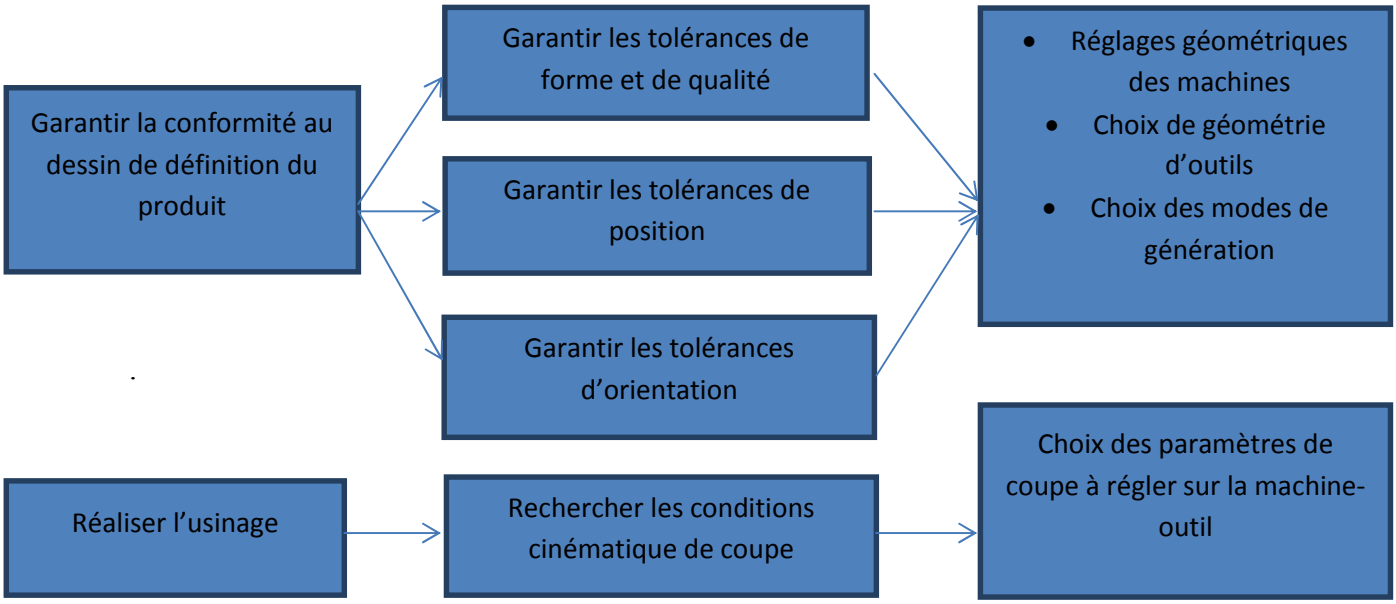



***Figure I.2****les fonctions d'assurions de situation d'usinage [1]*

cette technique, nous permet d'obtenir des pièces avec précision. Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la composition de deux mouvements relatifs entre la pièce et outil. le mouvement de coupe (vitesse de coupe Vc) et le mouvement d'avance (vitesse d'avance Va). **[2]**

***Figure I.3****les mouvements relatif entre la pièce et l'outil [2]*

## ***I.3 Les paramètres de coupe :***

### ***I .3.1 Généralité :***

La formation du copeau résulte l'action mécanique complexe. L'arête de coupe (intersection de la face de coupe avec la face de dépouille) pénètre dans la matière et provoque la formation du copeau. Le frottement de celui-ci sur la face de coupe et celui de la pièce sur la face de dépouille provoquent une augmentation importante de la température, qui peut entraîner une fusion locale du

copeau. Ce phénomène peut conduire à l'adhérence du copeau sur la face de coupe (copeau adhérent).la création d'une arête rapportée.

Les principaux facteurs influençant la formation du copeau sont :

- la vitesse de coupe Vc [m/min] ;
- la profondeur de passe a [mm] ;
- la vitesse d'avance Vf [mm/tour] ou [mm/dent/tour];
- la géométrie de l'outil ;
- les matériaux de l'outil et de la pièce ;
- la lubrification. **[2]**

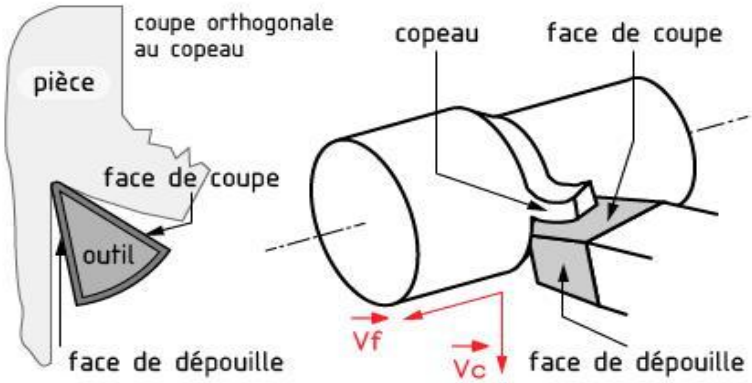



***Figure I.4****phénomène de coupe [2]*

## ***I .3.2 La notion de copeau minimum***

Lorsque la profondeur de passe, l'avance sont trop faibles : l'outil ne coupe plus. Le métal se comprime superficiellement et la pression de contact outil-pièce provoque l'usure prématurée de l'outil ainsi que l'obtention d'un mauvais état de surface. Il est nécessaire de choisir des valeurs minimales pour obtenir un résultat satisfaisant.**[2]**

## ***I .3.3 Les critères de choix :***

Plusieurs critères permettent de définir les paramètres de la coupe :

- le type de machine et sa puissance,
- la matière en œuvre,
- la matière de l'outil,
- le type d'opération.

L'objectif est d'obtenir une pièce usinée dans de bonnes conditions. Pour cela il faut déterminer certains paramètres spécifiques, notamment la vitesse de coupe $\mathbf{V_c}$, la vitesse d'avance $\mathbf{V_f}$ et la profondeur de passe **a**.

### *a) La vitesse de coupe $V_c$ [m/m in] :*

Représente l'espace parcouru (en mètres) par l'extrémité d'une dent de l'outil en une minute. Ce paramètre influe la durée de vie des outils et varie :

- avec le type de matière à usiner et le matériau de l'outil,
- selon la nature de l'opération (ébauche ou finition),
- par rapport au type d'usinage effectué (application d'un coefficient réducteur lorsque l'usinage est délicat),
- fonction d'utilisation des conditions de lubrification (travail à sec ou lubrifié).

Les valeurs usuelles des vitesses de coupe, fonction de la matière à usiner et de la matière de l'outil, sont données dans des abaques.

### *b) La fréquence de rotation N [tour/min] :*

se calcule par la formule suivante :

$$N = \frac{1000 * V_c}{\pi * D}$$

où $D$ [mm] représente le diamètre de la pièce à usiner (en tournage) ou le dia mètre de la fraise/du foret (en fraisage/perçage).

A l'aide des tableaux indiquant les fréquences de rotation disponibles sur les machines-outils, on choisit les valeurs les plus proches de celles calculées.

### *b) L'avance f ou fz [mm/tour] :*

S'exprime par le déplacement de la pièce (en fraisage) ou de l'outil (en tournage) pour :

- une dent; c'est l'avance par dent $\mathbf{f_z}$ utilisée en fraisage,
- un tour; c'est l'avance par tour **f** utilisée en tournage.

L'avance détermine principalement la rugosité de la surface. Elle est prise plus grande en ébauche qu'en finition, les valeurs des avances sont également données par des abaques

### *c) La vitesse d'avance :*

C'est la vitesse de translation de la pièce/outil qui sera affichée sur la machine. Ce paramètre se calcule par la formule suivante :

$$V_f = f_z * Z * N$$

Avec Z le nombre de dents de la fraise et N la fréquence de rotation.

***e) <u>Le paramètre profondeur de passe a :</u>***

Dépend de la surépaisseur de matière à usiner ainsi que de la nature de l'opération (ébauche ou finition). **[4]**

***<u>La section du copeau :</u>***

La valeur de l'avance par tour **f** multipliée par la profondeur de passe a déterminent la section du copeau enlevée par chaque dent, valeur qui influe elle-même la puissance demandée à la machine-outil. **[4]**

## *<u>I.4L'outil de coupe :</u>*

Un outil de coupant est constitué d'une queue (partie par laquelle est maintenu le porte-outil de machine) et 'une partie active appelée encore corps en matériau de l'outil. l'élément essentiel de par partie active est de coupe principale qui est l'intersection de face de coupe et de la face de dépouille principale **[3]**

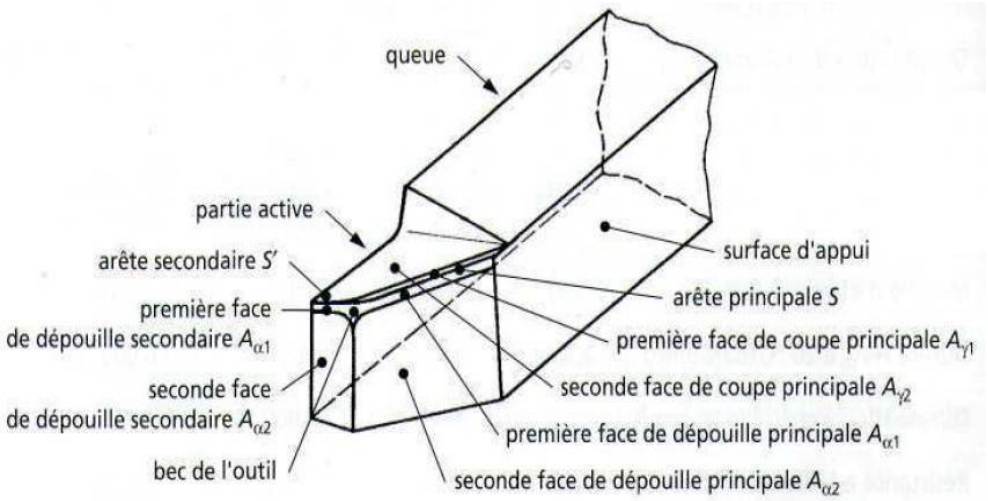



***Figure I.5.****Arêtes et parties actives d'un outil de tournage [3]*

## *<u>I .41Géométrie des outils de coupe :</u>*

La plaquette de coupe est la partie active dans une opération d'usinage. Les outils de coupe se caractérisent par leurs matériaux et par différents paramètres géométriques comme : les angles de coupe, l'acuité d'arête, le brise-copeaux, et le rayon de bec. La géométrie des outils est étudiée pour assurer une formation aisée des copeaux, offrir une arête de coupe robuste et fragmenter les copeaux en éléments d'une longueur acceptable. **[3]**

## *I .4.2Les angles de coupe :*

Les angles de coupe sont repérés dans différents plans de projection. Dans le cas de l'outil en main, les principaux plans de projection sont les plans : Pf, Pp, Pr, Ps  Les angles de coupe sont :

- Angle de direction d'arête principale Kr (angle mesuré entre le plan Pf et ps).
- Angle d'inclinaison de l'arête de coupe l s (angle mesuré entre le plan Pr et l'arête de cou.
- Angle de pointe de l'outil e R (angle mesuré entre le plan principal Ps et le plan secondaire.
- Angle de direction d'arête secondaire Kr' (angle mesuré entre le plan Pf et le plan Pr). **[3]**

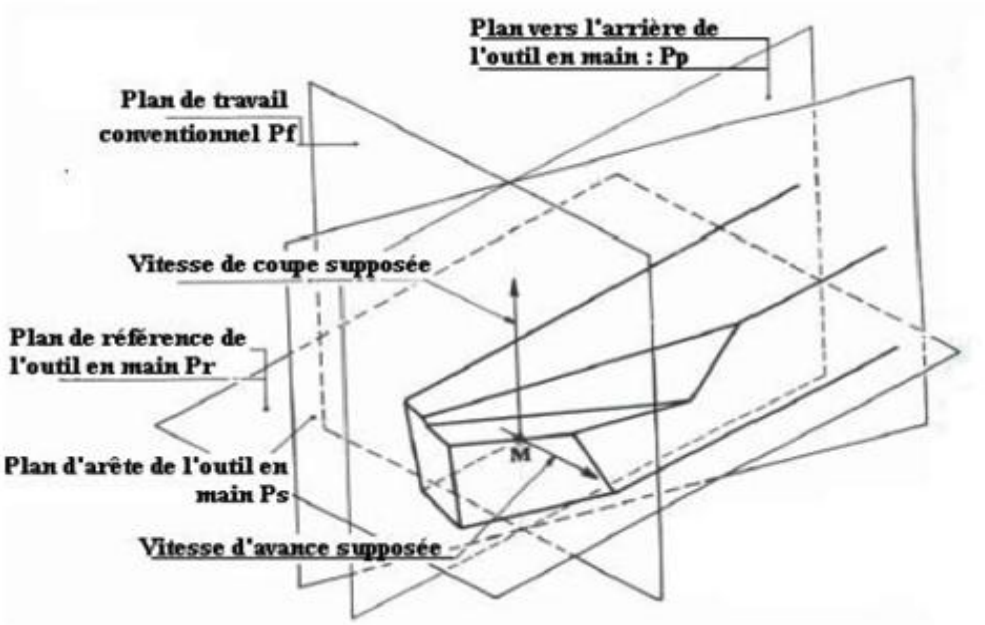



***Figure I.6.****Principaux plans de l'outil en main. [4]*

Les angles de direction d'arête principale Kr, de pointe de l'outil e r, et de direction d'arête secondaire Kr' sont liés par l'équation (eq I.1).

$$Kr + \varepsilon r + Kr' = 180° \qquad (I.1)$$

Les angles g f angle de coupe et l s angle d'inclinaison sont les éléments fondamentaux pour l'évacuation des copeaux. La variation de l'angle de pointe de l'outil de coupe joue un rôle sur la durée de vie de l'outil et sur la segmentation des copeaux. L'augmentation de l'angle de coupe g f diminue les forces de coupe et la température durant l'usinage. L'angle en dépouille principale a f n'a aucune influence sur les forces de coupe. Mais les angles en dépouille principale a f , et secondaire a f 0 , sont très importants et seront toujours minimisés pour augmenter la résistance mécanique des arêtes et du bec de l'outil . Plus l'angle de dépouille d'une plaquette augmente plus la résistance de l'arête de coupe de cette plaquette aux forces mécanique diminue. L'angle de dépouille a f  joue un rôle important sur l'usure de la face de dépouille, car plus cet angle est grand plus l'usure en dépouille diminue. **[3]**

***Mouvement relatif outil / pièce***

Lors de la génération d'une surface par enlèvement de matière, la surface engendrée sur la pièce est due au mouvement de l'outil par rapport à la pièce.

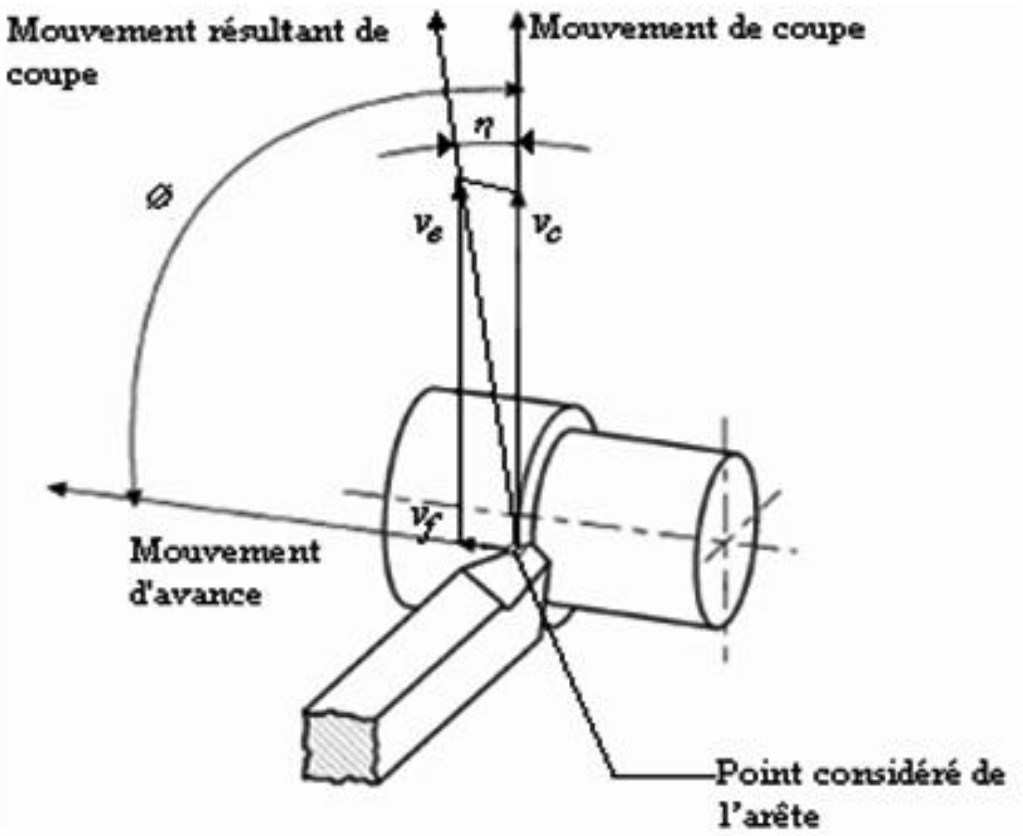



***Figure I.7.*** *Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage. [2]*

- ***<u>Mouvement de coupe Mc</u>***

Le mouvement de coupe est un mouvement relatif principal entre l'outil et la pièce. Il participe directement au détachement de la matière sous forme de copeaux Pendant la course de travail.

- ***<u>Mouvement d'avance Ma</u>***

Au mouvement de coupe, vient s'ajouter un autre mouvement relatif entre l'outil et la pièce, le mouvement d'avance, nécessaire à la génération de la surface de la pièce. Il peut être composé de plusieurs mouvements mais seulement de façon à ce qu'au moins une de ses composantes soit rectiligne. Le mouvement d'avance a pour but de décaler latéralement une quantité f dite avance, pour que l'outil puisse à la nouvelle course de travail détacher d'autres copeaux.

Le mouvement de coupe et le mouvement d'avance combinés constituent le mouvement résultant de coupe (*v e*), alors que l'angle contenu entre ces deux mouvements est appelé angle de direction d'avance (Ø) .

- ***Mouvement de pénétration M p***

C'est le mouvement qui détermine l'épaisseur de la couche de métal à enlever à chaque opération qui prend le nom de passe.**[2]**

## *I.5.Matériaux utilisés pour les outils :*

***L'acier rapide :***

(HSS - High Speed Steel), qui est un acier fortement allié, est très employé pour la production d'outils de coupe. Les caractéristiques qui le rendent intéressant sont sa dureté d'environ 65 HRc et sa ténacité qui lui confère une bonne longévité.
les carbures métalliques :

Rentrent dans cette catégorie les alliages composés de tungstène (60-90%), titane et tantale (1-35%) et de cobalt ou nickel (5-15%), ainsi que d'autre matières en plus faibles quantités comme le molybdène ou le vanadium. La fabrication du métal dur est réalisée par frittage, on en fait généralement des plaquettes que l'on fixe sur le corps de l'outil par brasage, avec une vis ou aussi par bridage. Certains outils de petites dimensions sont fabriqués entièrement en métal dur. **[3]**

Les outils en carbure se présentent sur marché en deux types .à savoir :

- Les outils à plaquettes en carbure brasées dont la plaquette se trouve brasée au prote plaquette
- Les outils à plaquettes en carbure amovibles : ils sont formes de trois blocs. à savoir, le porte plaquette. la plaquette intercalaire et la plaquette. cet est à jeter une fois sa durée de vie est atteinte. leurs principales formes et dimensions sont normalisées

***Céramique :***

Les outils a plaquettes en céramique amovibles ont une grande dureté (donc une faible ténacité) et une grande stabilité à haute température. ils permettent un grand débit de matière. Mais nécessitent une grande stabilité de la machine et un strict respect des conditions de coupe. Ils sont généralement utilisés pour les opérations de finition

***Cermet :***

ce sont des outils à plaquettes en cermet amovibles. le nom cermet vient de céramique –métal car il représente les carbures ayant des particules de titane .de carbonitrure de titane ou nitrure de titane. Les applications typiques sont la finition des aciers inoxydables, des fontes, des aciers à bas carbone et des aciers ferritiques.

***Nitrure de bore cubique :***

Ce sont des outils à plaquettes amovibles en nitrure de bore cubique (matériau le plus dur après le diamant) noté CBN. Il comporte l'avantage de ne pas s'oxyder à haute température. Son utilisation requiert une machine stable, une grande rigidité de la pièce et du porte pièce et un arrosage

***Diamant :***

Le diamant a un faible coefficient de frottement. il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à basse température tel que les alliages d'aluminium, les alliages de cuivre, les alliages de magnésium thermodurcissables etc et ne convient pas à l'usinage des matériaux ferreux. **[3]**

***Remarque :***

Le choix de l'outil de coupe dépend directement de la matière à usiner ainsi que l'opération à réaliser.

## *I.6. Choix du matériau de l'outil de coupe :*

le diagramme qui nous permet de déterminer les différents matériaux d'outils utilisée dans les déférents domaine. Il est représentatif des conditions normales et de leurs utilisations en ébauche pour usiner les aciers et les fontes. Il ne peut pas être utilisé pour choisir les conditions de coupe **[3]**

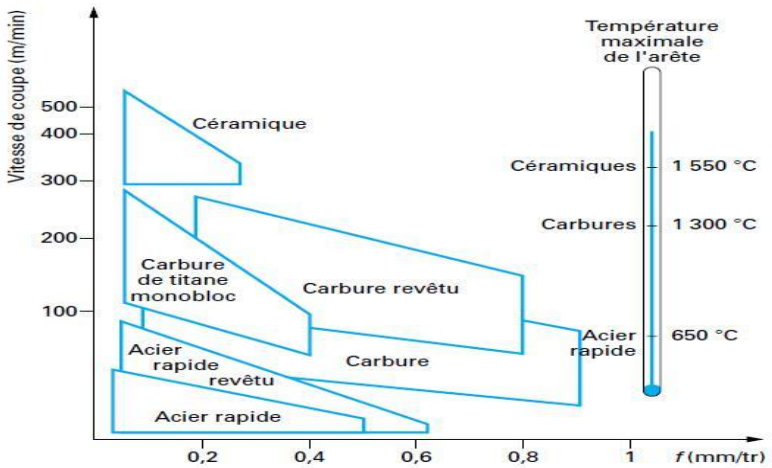



***Figure I.8**.Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant [4]*

## *I.7 Revêtements :*

Souvent, les outils en acier rapide ou en métal dur sont revêtus d'une ou plusieurs couches, ils possèdent une durée de vie plus longue et permettent une augmentation des vitesses d'usinage et un état de surface meilleur. Les différents types de revêtement sont :

- Le nitrure de titane (TiN), matériau standard.
- Le carbonitrure de titane (TiCN), grande dureté, bonne résistance à l'abrasion.
- L'oxyde d'aluminium ($Al_2O_3$) et nitrure de silicium ($Si_3N_4$), appartiennent à la classe des céramiques ; ce sont deux matériaux de base auxquels on peut additionner différentes matières en fonction des caractéristiques recherchées : oxyde de zirconium ($ZrO_2$), carbure de titane (TiC) ou du carbure de silicium (SiC).
- Le diamant utilisé pour l'usinage de métaux non-ferreux et de non-métaux abrasifs tels que : carbone ou céramique.
- Le nitrure de bore utilisé pour l'usinage de métaux ferreux trempés.**[3]**

## *I.8.Machine-outil :*

Une machine-outil est un équipement mécanique destiné à exécuter un usinage ou autre tâche répétitive, avec une précision et une puissance adaptées. C'est un moyen de production destiné à maintenir un outil fixe, mobile, ou tournant, et à lui imprimer un mouvement afin d'usiner ou déformer une pièce ou un ensemble fixé sur une table fixe ou mobile.

### *I .8.1 Les types de machine –outil :*

Sont notamment des machines-outils :

Les machines-outils pour l'enlèvement de matière :

- les scies motorisées
- le tour
- la fraiseuse
- la rectifieuse
- la perceuse à colonne
- l'étau limeur
- la machine transfert

Les outils pour l'assemblage :

- la visseuse.

Les machines-outils peuvent être classées selon deux grandes catégories :

- machine-outil conventionnelle (tour conventionnel, fraiseuse conventionnelle…) ;

***Figure I.9****Fraiseuse conventionnelle* ***[3]***

- machine-outil à commande numérique (tour CN, fraiseuse CN…) ou centre d'usinage à plusieurs fonctions.

***Figure I .10****Fraiseuse et tour en CN [3]*

## ***I.8.2Le type de commande :***

Manuelle ou conventionnelle.

Le déplacement de l'outil sur la trajectoire d'usinage est réalisé par un opérateur. Pour cela, il utilise les manivelles permettant de générer les mouvements suivant les axes. Mouvement ne sont possibles que sur un seul axe à la fois.

***Figure I.11***.*Manivelle [3]*

Des moteurs permettant aussi de choisir des vitesses d'avance suivant les axes de déplacement, le choix de ces vitesses s'effectue par l'intermédiaire d'une boite de vitesse mécanique.

***Figure I.12.****Boite vitesse [3]*

## ***I .8.3 Machine- outil à commande numérique :***

Dans le domaine de la fabrication mécanique le terme « commande » désigne l'ensemble des matériels et logiciels ayant pour fonction de donner les instructions de mouvements à tous les éléments d'une machine-outil :

- l'outil (ou les outils) d'usinage équipant la machine,
- les tables ou palettes où sont fixées les pièces,
- les systèmes de magasinage et de changement d'outil,
- les dispositifs de changement de pièce
- les mécanismes connexes, pour le contrôle ou la sécurité, l'évacuation des copeaux…

## ***I .9 Le tournage :***

## ***I .9.1 Définition :***

Tournage concerne l'ensemble des opérations réalisées sur des tours.
On réalise par ce type d'usinage toutes les surfaces de révolution, y compris les plans, lorsque la trajectoire du point générateur est située dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation. Dans le tournage conventionnel les outils de coupe ont une seule arête tranchante. La coupe est obtenue par engagement de cette arête dans la matière.**[]**

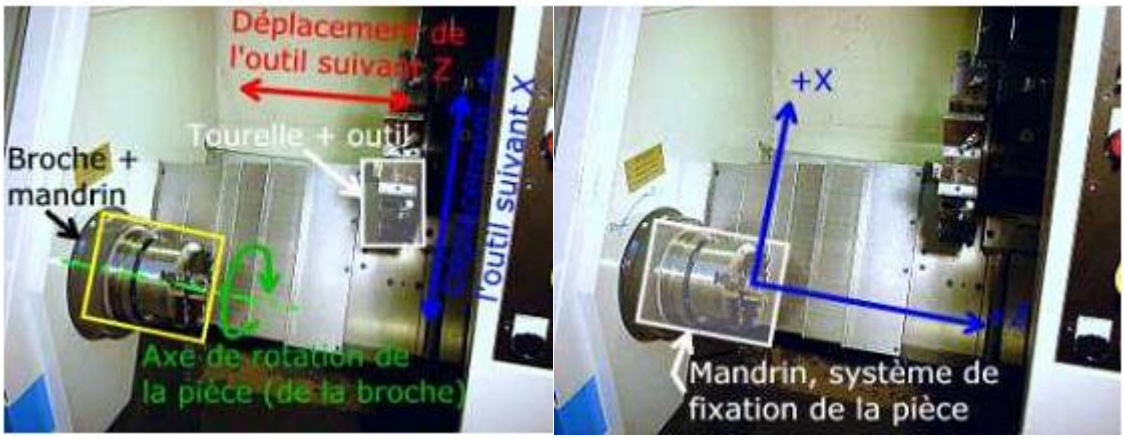



***Figure I.13.****Présentation des axes de mouvement [3]*

On distingue deux classes distinctes d'opérations de tournage :

- les opérations de tournage extérieur,
- les opérations de tournage intérieur.

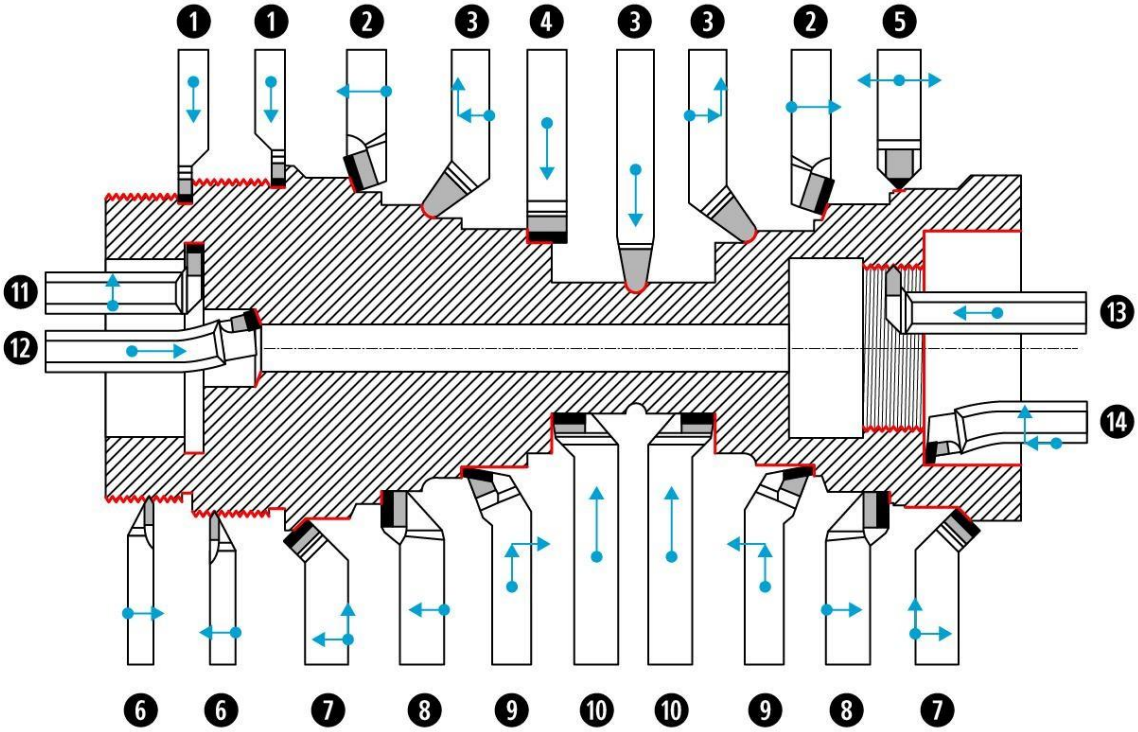



***Figure I.14****les défirent outils de tournage [3]*

| | |
|---|---|
| **1** | **Outil à saigner** |
| **2** | **Outil à charioter droit** |
| **3** | **Outil à retoucher** |
| **4** | **Outil pelle** |
| **5** | **Outil à retoucher** |
| **6** | **Outil à fileter (extérieur)** |
| **7** | **Outil à charioter coudé** |
| **8** | **Outil couteau** |
| **9** | **Outil à dresser d'angle** |
| **10** | **Outil à dresser les faces** |
| **11** | **Outil à chambrer** |
| **12** | **Outil à aléser** |
| **13** | **Outil à fileter (intérieur)** |
| **14** | **Outil à aléser et dresser** |

La normalisation concerne aussi bien les outils en acier rapide que les outils à plaquettes en carbure. Le nom de l'outil est lié à sa fonction (ex : outil à charioter).

Notons, toutefois, que certains outils conviennent pour plusieurs fonctions différentes. Enfin, les outils peuvent être à gauche ou à droite.

En fonction de la profondeur de passe on distingue :

- l'ébauche,
- la finition.
- ***Définition L'ébauche:***

Permet d'enlever un maximum de matière en un minimum de temps.

Un outil d'ébauche doit supporter des efforts de coupe importants.

- ***Définition La finition :***

est le dernier usinage d'une surface, elle permet d'obtenir une très bonne qualité (rugosité) sur les surfaces usinées.**[3]**

## *I.9.2Machine-outil:*

Le tour c'est une machine d'outillage conçue pour le travail unitaire et la petite série. Il permet la réalisation de différentes surfaces nécessitant toujours une rotation de la pièce autour d'un axe de révolution.
Durant le processus de tournage la pièce à usiner effectue des rotations dans le tour.
L'outil de coupe opère longitudinalement ou bien transversalement par rapport à la pièce à usiner. Le travail de l'outil de coupe s'opère à une vitesse déterminée, c'est ce que l'on appelle la vitesse d'avance.

Une certaine profondeur de coupe est de plus nécessaire pour le détachement des copeaux. **[3]**

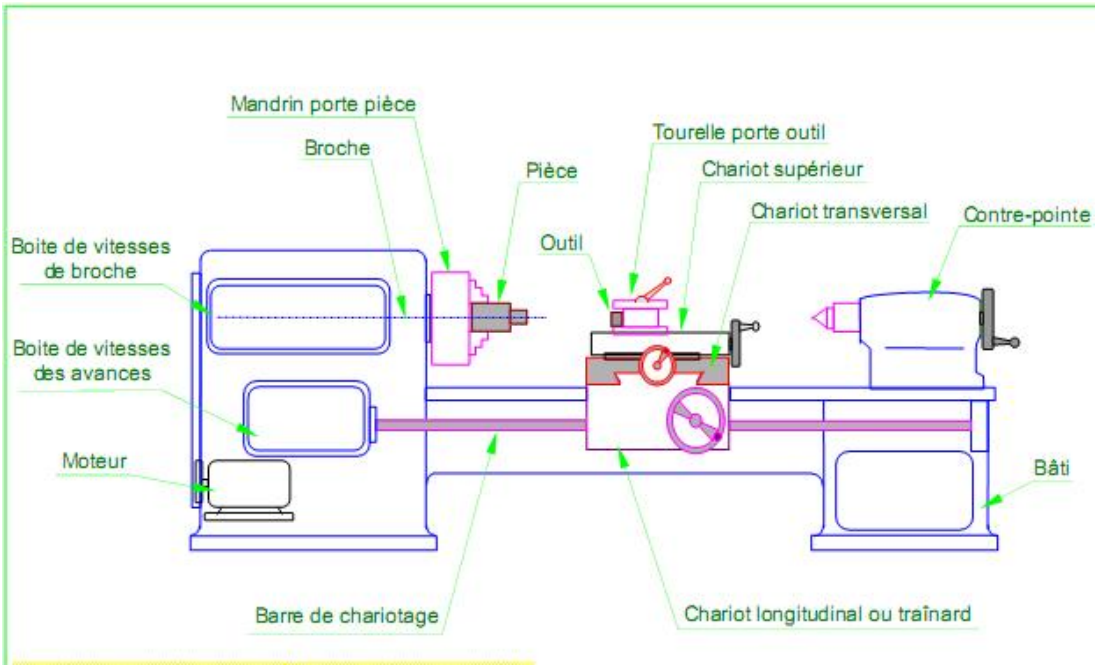



***Figure I.15****Chemin d'un tour parallèle [3]*

## *I.9.3 Classification des machines de tour*

Les machines-outils les plus courantes utilisées pour le tournage sont:

- ***Les tours parallèles à charioter et à fileter***

Ces machines sont utilisées pour les travaux unitaires ou de petites et moyennes séries sur des pièces très simples. Ces tours sont peu flexibles. Seules les surfaces dont les génératrices sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche sont réalisables en travail d'enveloppe. **[3]**

- ***Les tours à copier***

Ils permettent l'usinage de pièces par reproduction, à partir d'un gabarit, grâce à un système de copiage hydraulique qui pilote le déplacement du chariot transversal. C'est une machine assez flexible qui peut convenir pour des travaux de petites à grandes séries. La génératrice des surfaces de révolution peut être quelconque. **[3]**

- ***Les tours semi-automatiques***

Ce sont des tours équipés d'un traînard semblable à celui d'un tour parallèle avec une tourelle hexagonale indexable munie de 6 postes d'outils animée d'un mouvement longitudinal contrôlé par des butées. Les outillages spécialement conçus pour la machine permettent des opérations simples et précises. La commande de ces tours peut être manuelle ou en partie.

Automatique. La flexibilité de ces machines est très limitée. On les utilisera pour des travaux de moyenne série. **[3]**

- ***Les tours automatiques***

Plusieurs outils sont montés tangentiellement à la pièce. Les mouvements sont obtenus par des cames qui donnent la vitesse d'avance et la course de chaque outil. Une came est spécifique à une opération et à une pièce. Ces tours sont entièrement automatiques. Ces machines n'ont aucune flexibilité. Elles conviennent pour les très grandes séries. **[3]**

- ***Les tours automatiques multibroches***

Ce type de tour comportera par exemple huit broches. Huit outils soit un par broche travaillent en même temps et effectuent une opération différente. Ce sont les broches qui tournent d'un huitième de tour pour présenter la pièce devant l'outil suivant. Lorsque les broches ont effectuées un tour complet la pièce est terminée. Il est possible de travailler dans la barre. Sur ce type de tour les réglages sont longs et le temps de passage d'une série à l'autre immobilise la machine. Ce tour sera réservé pour les grandes et très grandes séries à des pièces de dimensions réduites à cause de l'espacement entre les broches. **[3]**

- ***Les tours à commande numérique***

Comme en copiage la génératrice de la pièce peut être quelconque mais ici la trajectoire de l'outil est obtenue par le déplacement simultané de deux axes dont les positions successives sont données par un calculateur travaillant à partir d'un programme propre à la pièce. Ces tours sont équipés d'un magasin d'outils et éventuellement d'un système de chargement des pièces. La flexibilité de ces machines est très grande et particulièrement bien adapté pour le travail unitaire ou les petites séries répétitives. **[3]**

## *I .9.4 Régime de coupe en tournage :*

Les paramètres de la coupe sont, d'une part, des grandeurs qui caractérisent les déplacements de l'outil et de la pièce usinée (paramètres cinématiques de coupe) et, d'autre part, les valeurs des surépaisseurs d'usinage et des dimensions de coupe (paramètres géométriques de coupe)

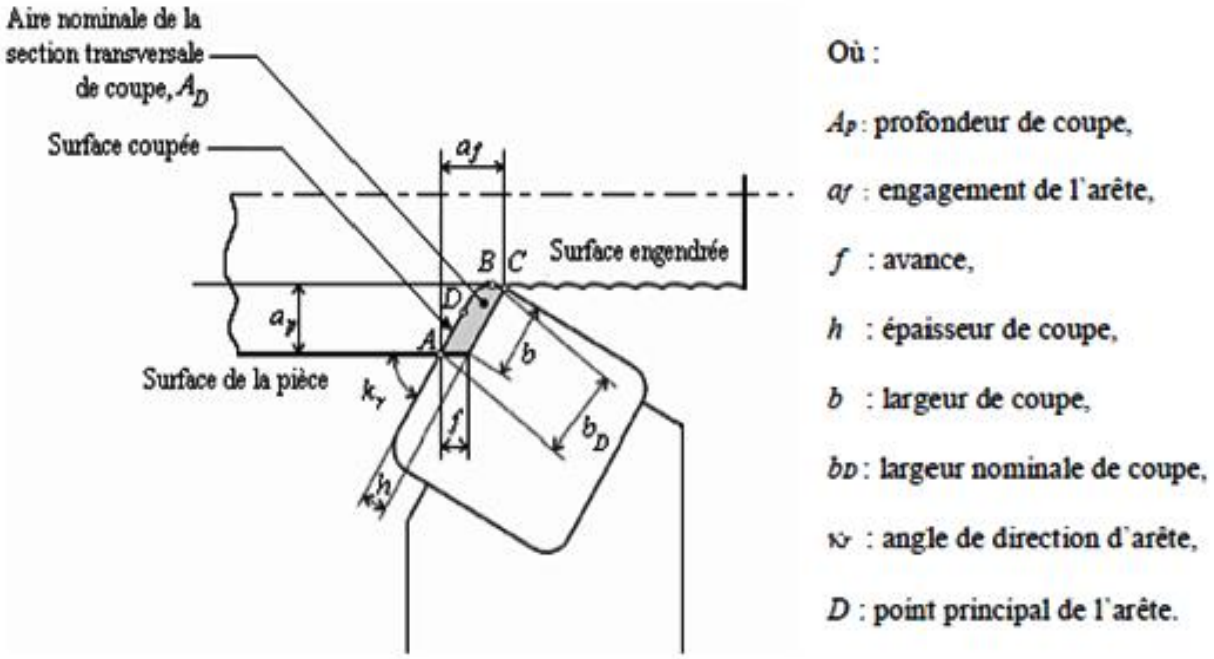



***Figure I.16****Dimensions de coupe dans le cas de tournage. [4]*

- ***<u>Vitesse de coupe</u>***

- La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse $\omega$ *rad* / *s* (soit *N tr* / min), cette vitesse angulaire étant communiquée par la broche de la machine via le porte-pièce. Compte tenu du diamètre de la pièce au point d'usinage situé sur un diamètre *D*, la vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil (supposé fixe par rapport à la machine) vaut:

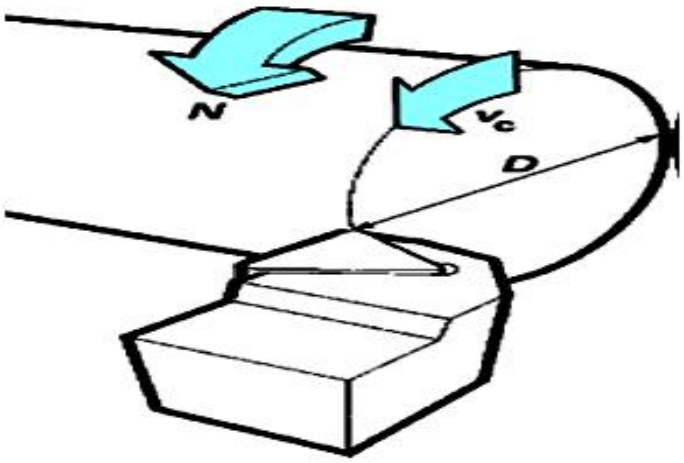



***Figure I.17.****vitesse de coupe.[4]*

$Vc = \frac{\pi.D.N}{1000}$ (m / min) (I-1)

Cette vitesse est appelée vitesse de coupe soit, avec les unités traditionnelles de la fabrication mécanique

$V_c$: vitesse de coupe($m$ / min)

$D$ : Diamètre de la pièce($mm$)

$N$ : Fréquence de rotation ($tr$ / min )

Il convient d'observer que la vitesse de coupe n'est constante que si la vitesse de broche et le diamètre de la pièce demeurent inchangés. En dressage, par exemple où l'outil se déplace en direction du centre, la vitesse de coupe varie continuellement si la rotation de la pièce s'effectue à une vitesse constante de la broche. Or, pour une productivité maximale et une meilleure qualité des surfaces obtenues, il est souhaitable de maintenir la vitesse de coupe constante. Sur un grand nombre de tours modernes, la vitesse de broche augmente au fur et à mesure que l'outil approche de l'axe, afin de compenser ainsi la diminution de diamètre. Mais dans le cas de très petits diamètres, cette compensation se révèle impossible du fait de la plage de vitesse limitée qu'autorisent les machines. De même, lorsqu'une pièce, comme cela est souvent le cas, présente des diamètres différents ou est de forme conique ou courbe, la fréquence de rotation doit être corrigée en fonction du diamètre, pour maintenir la vitesse de coupe constante.

Le préparateur choisit cette vitesse de coupe en fonction, notamment :

- des matériaux de la pièce et de l'outil
- de la lubrification
- de la durée de vie souhaitée pour l'outil.

➢ *Vitesse d'avance $V_f$ , Avance par tour $f$ :*

La vitesse d'avance $V_f$
rapport au bâti.

L'avance par tour $f$( $mm$ / $tr$ ) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent.

***Figure I.18*** *Vitesse d'avance Va. [4]*

$$V_f = f \times N\,(mm/\min) \qquad \text{(I-2)}$$

$V_f$ **:** vitesse d'avance($mm$/ min)

$F$ **:** L'avance($mm$)

$N$ **:** Fréquence de rotation($tr$/ min)

- ***Les types d'avances***

On distingue trois sortes d'avance

***a) Avance longitudinal***

On appelle avance longitudinale si l'outil se déplace parallèlement à l'axe de l'ébauche.

***b) Avance transversale***

On appelle avance transversale si l'outil se déplace perpendiculairement à l'axe de l'ébauche.

***c) Avance oblique***

On appelle avance oblique si l'outil se déplace sous un angle par rapport à l'axe de l'ébauche. **[4]**

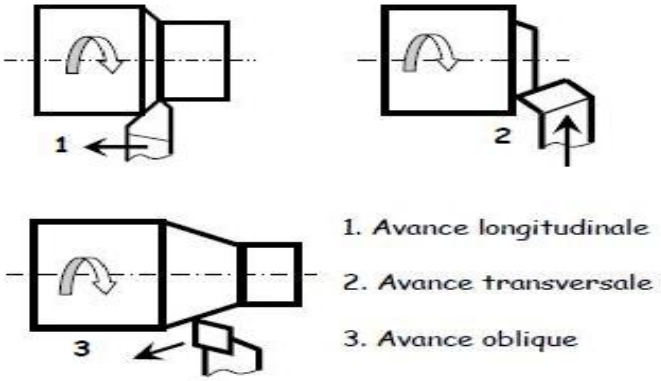



***Figure I.19***. *Différente types d'avance [3]*

- ***Profondeur de passe « a »***

La profondeur de passe notée *a* en (mm), correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas du tournage. La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil.

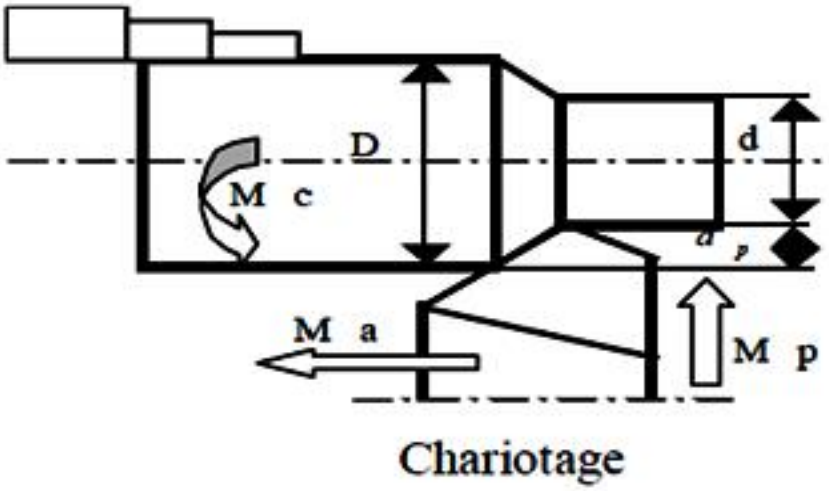



***Figure I.20****Représentation de la profondeur de passe p. [3]*

## ***I.9.5Les définitions des principales opérations de tournage :***

- ***Le chariotage :***

Le **chariotage** est l'opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique extérieure.

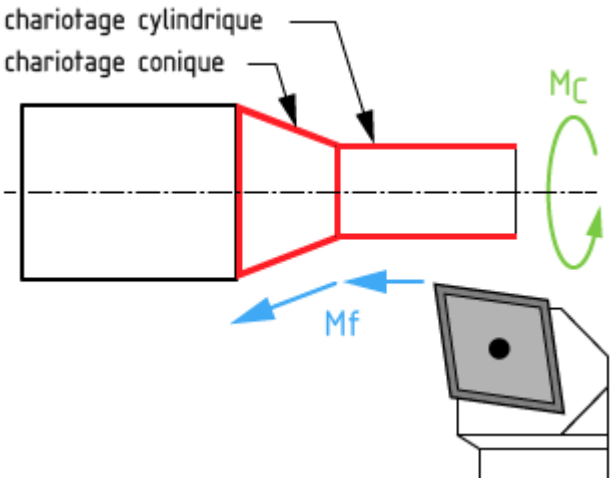



***Figure I.21****Le chariotage cylindrique et conique [5]*

- ***<u>Le dressage :</u>***

Le **dressage** est l'opération qui consiste à usiner une surface plane (extérieure ou intérieure) perpendiculaire à l'axe de la broche.

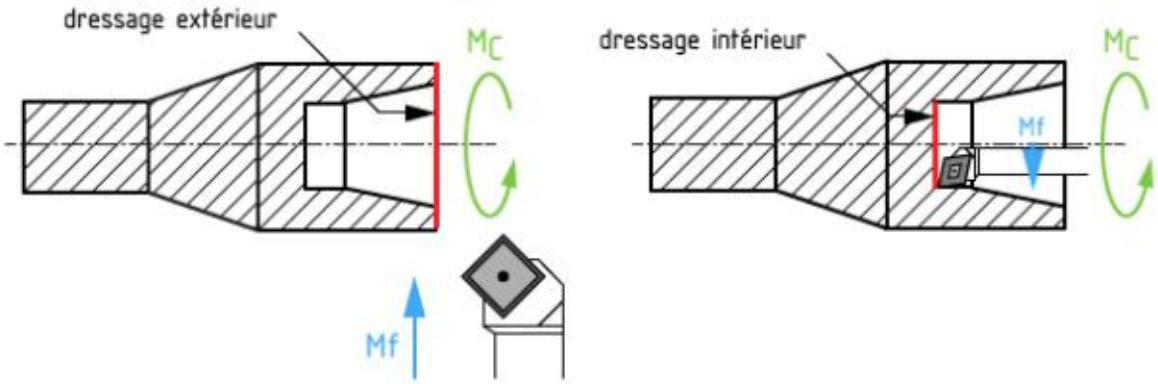



***Figure I.22****.Dressage extérieur et intérieur [5]*

- ***<u>Le perçage :</u>***

Le **perçage** est l'opération qui consiste à usiner un trou dans la pièce (débouchant ou borgne) à l'aide d'une forêt. Souvent, l'axe du trou est confondu avec celui de la pièce.

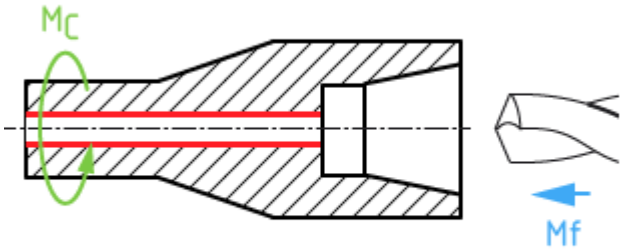



***Figure I.23.****Le perçage [5]*

- ***<u>L'alésage :</u>***

L**'alésage** est l'opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique de qualité à l'intérieur d'une pièce.

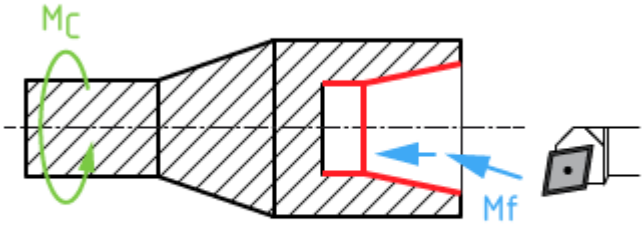



***Figure I.24.****L'alésage cylindrique et conique [5]*

- ***<u>Le rainurage :</u>***

Le **rainurage** est l'opération qui consiste à usiner une rainure (association de 3 plans) intérieure ou extérieure. Celle-ci peut servir par exemple pour le logement d'un circlips ou d'un joint torique.

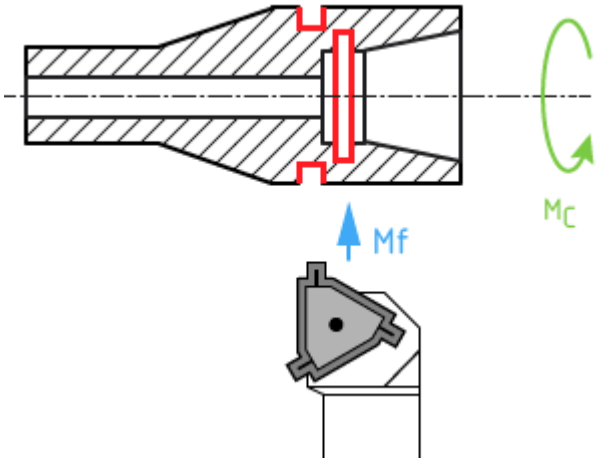



***Figure I .25.****Le rainurage intérieur et extérieur [5]*

- ***<u>Le tronçonnage :</u>***

Le **tronçonnage** est l'opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin de détacher un tronçon.

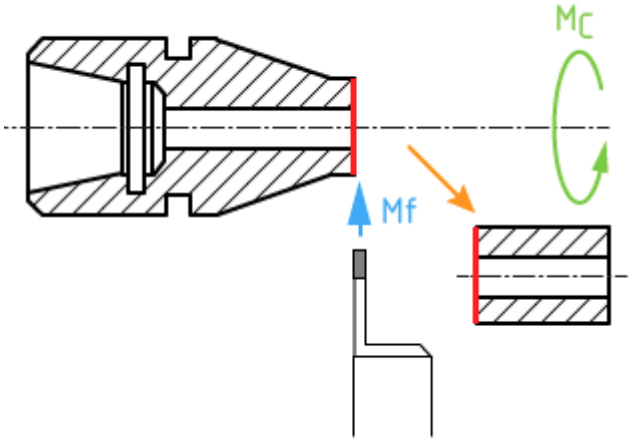



***Figure I .26****.Le tronçonnage [5]*

- ***<u>Le filetage :</u>***

Le **filetage** est l'usinage consistant à réaliser un filetage extérieur ou intérieur.

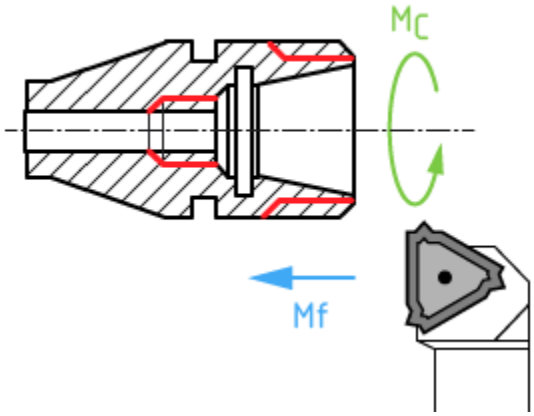



***Figure I.27**.Le filetage intérieur et extérieur [5]*

- ***L'épaulement***

L'**épaulement** est l'association d'un chariotage et d'un dressage.

- ***Le profilage***

Le **profilage** est la réalisation de surfaces quelconques par l'association de surfaces cylindriques, planes, coniques, sphériques, etc...

***Les outils de tournage : désignation, mode d'action et cycle de travail***

Les mouvements relatifs outil-pièce en tournage sont :

- le mouvement de coupe $M_c$ ,
- le mouvement d'avance $M_f$ ,
- le mouvement de position $M_p$ .

Pour la réalisation des diverses opérations de tournage, on dispose des outils suivants :

- ***Les outils à charioter***

Ces outils se caractérisent par une seule direction de travail possible pour la réalisation de cylindres ou de cônes extérieurs. Si la pièce comporte un épaulement, on obtient une surface en travail d'enveloppe et une surface en travail de forme.

Sur la figure ci-dessous sont illustrées quelques exemples d'outils à charioter.

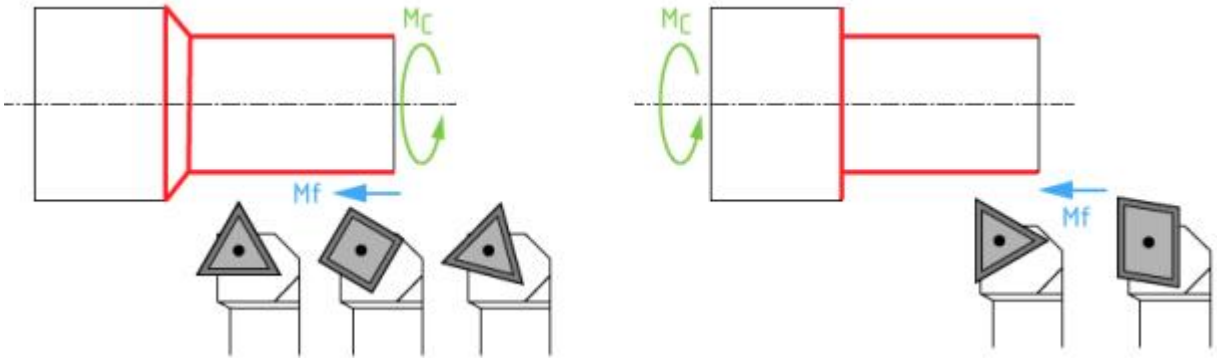



***Figure I.28.****Les outils à charioter. Epaulement conique et épaulement droit [5]*

- ***<u>Les outils à dresser :</u>***

Pour ce type d'outils une seule direction de travail est possible, perpendiculairement à l'axe de la pièce, pour la réalisation de surfaces planes extérieures ou intérieures. Si la pièce comporte un épaulement on obtient une surface en travail d'enveloppe et une surface en travail de forme.

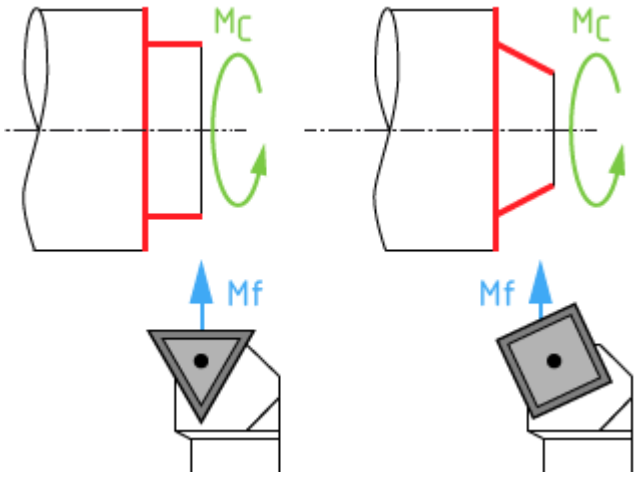



***Figure I.29.****Le dressage extérieur cylindrique et conique [5]*

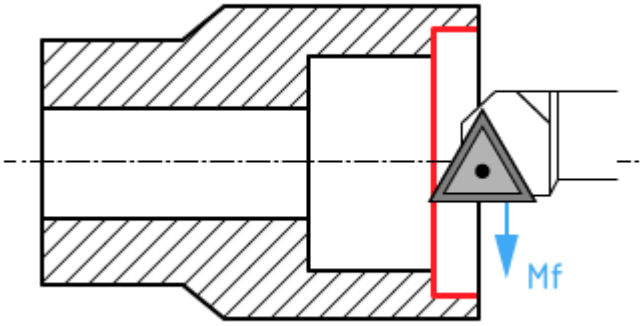



***Figure I.30***.*Le dressage intérieur [5]*

- ***Les outils à aléser :***

Pour les opérations d'alésage on retrouve les mêmes principes que pour les outils d'extérieur. Les outils à aléser sont des outils avec une seule direction de travail possible pour la réalisation de cylindres ou de cônes intérieurs.

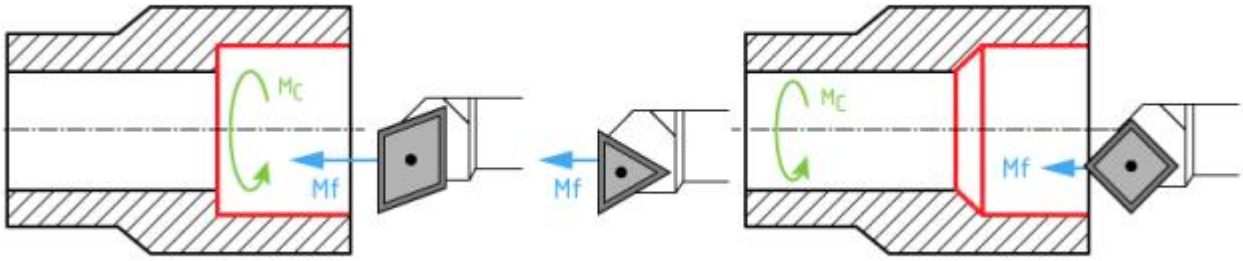



***Figure I.31****Alésage cylindrique et alésage conique [5]*

***Les outils à charioter-dresser***

Les outils à charioter-dresser sont des outils présentant au minimum deux directions possibles de travail leur permettant d'effectuer des opérations de chariotage et de dressage de surfaces extérieures en travail d'enveloppe.

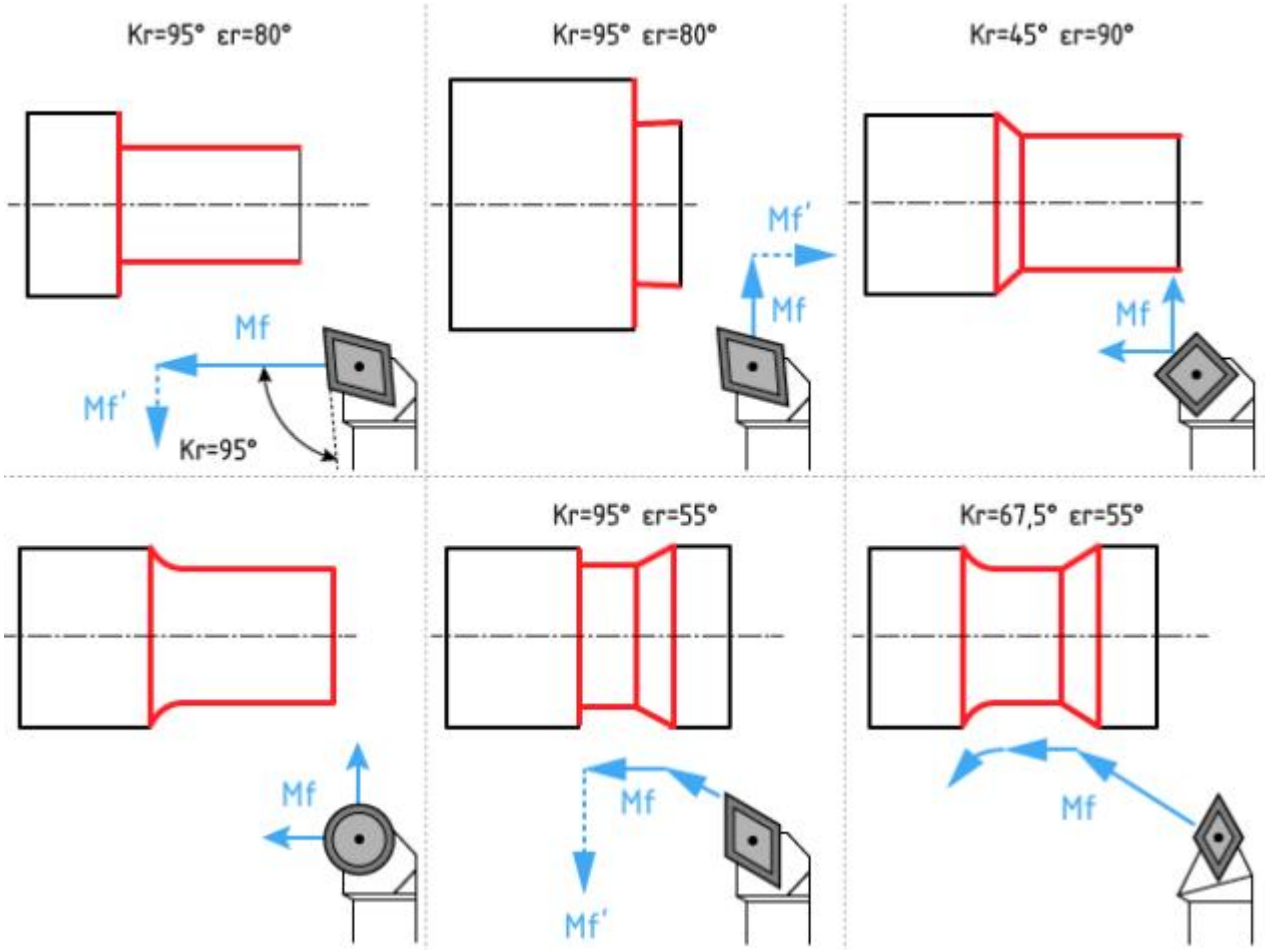



***Figure I.32****Différents outils à charioter et dresser [5]*

- ***<u>Les outils à aléser-dresser :</u>***

Au minimum deux directions possibles de travail permettent à ces outils d'effectuer des opérations d'alésage et de dressage des surfaces intérieures.

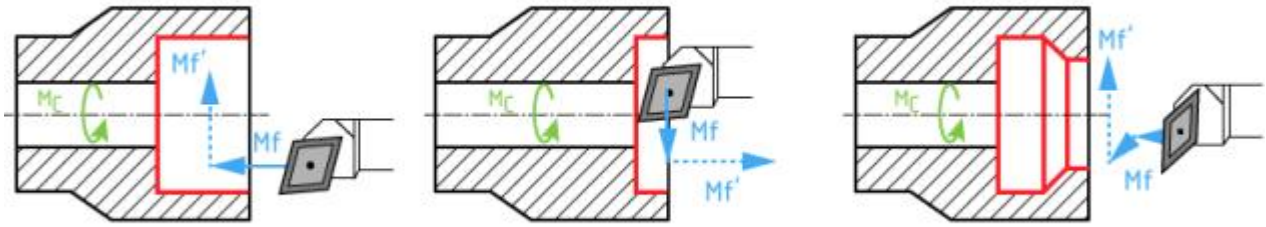



***Figure I.33.****Divers outils à aléser et dresser [5]*

- ***<u>Les outils à rainurer</u>***

Ces outils ont comme utilisation la réalisation des opérations de rainurage.

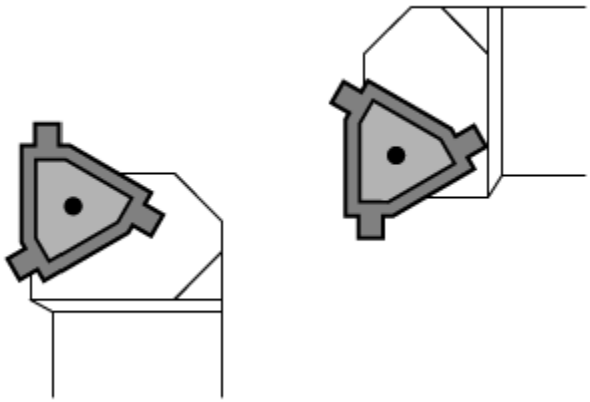


***Figure I.34****Les outils à rainurer [5]*

- ***<u>Les outils à tronçonner</u>***

Ces outils sont utilisés pour la réalisation des opérations de tronçonnage.

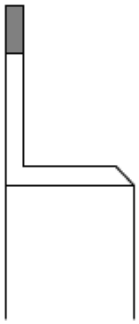


***Figure I.35.****Outil à tronçonner [5]*

- ***<u>Les outils à fileter</u>***

Ce sont des outils utilisés pour la réalisation des opérations de filetage.

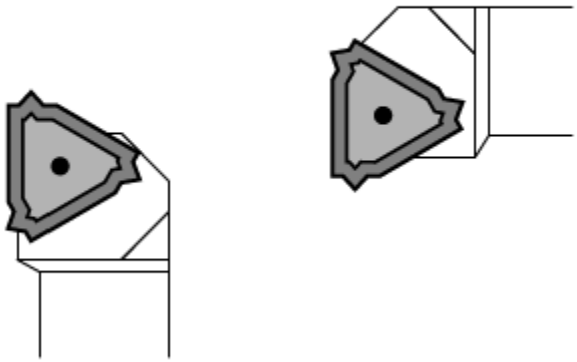


***Figure I .33****Outils à fileter [5]*

# Chapitre II

# La rugosité de surface

## ***II. Introduction :***

Plusieurs travaux ont été réalisés pour essayer de relever les facteurs qui influent sur l'état de surface, sur le comportement tribologique des pièces dans un mécanisme [6]. Il a été montré qu'il existe une relation étroite entre les procédés de fabrication des pièces mécaniques et la qualité des surfaces en service. Ces dernières années ont vue une grande évolution des techniques de finition des surfaces des pièces [7], mais le premier souci du fabricant c'est d'obtenir des pièces de qualité qui répondent aux exigences techniques et fonctionnelles toute en minimisant le coût de fabrication [8].

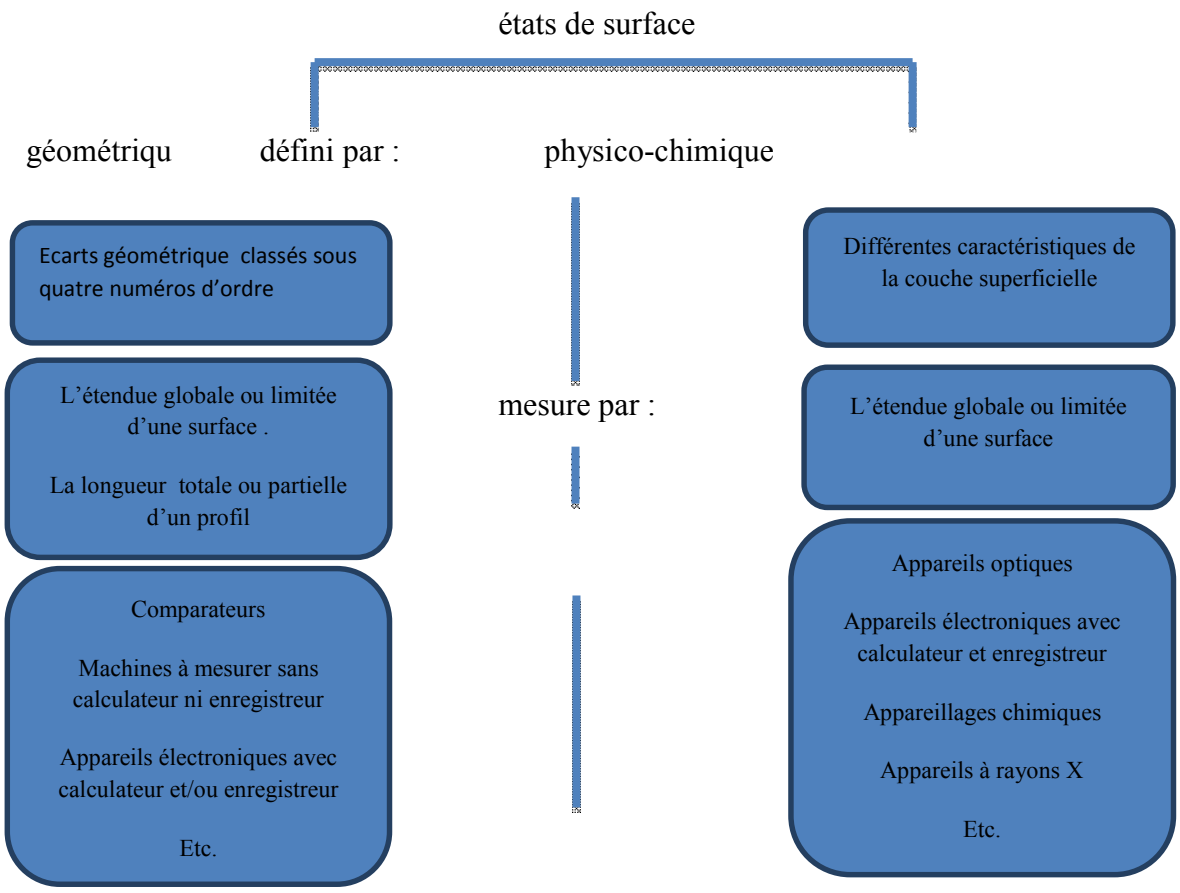
Cette étude permet de montrer l'importance du procédé de finition des surfaces, et son impact sur la qualité. Trois surfaces ont été finies par les procédés suivants :

Le tournage très utilisé, connu pour sa grande productivité, disponibilité de l'outillage, et qui est relativement économique.

La rectification ayant pour avantage l'amélioration de la qualité de surfaces, mais qui reste toujours un moyen de finition très couteux. Le procédé de traitement mécanique superficiel en l'occurrence le brunissage (galetage à la bille), qui est une technique de finition par déformation plastique superficielle, caractérisée par sa grande productivité et son coût réduit. Il connait plusieurs avantages tels que: l'amélioration de l'état de surface et les caractéristiques mécaniques superficielle.

## ***II .1.Généralités sur les états de surface :***

La structure superficielle lors de l'usinage de métaux par enlèvement de copeaux est Déterminée par les irrégularités résultant de la déformation de la face usinée. Elle Varie essentiellement selon le routage d'usinage, les conditions de coupe, et la Matière en œuvre. et la rigidité d'un système d'usinage. **[9]**




## ***II .2 Rugosité :***

C'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, etc.

Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.).

Plus **l'indice de rugosité** est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication. **[9]**

## II .*3 Les défauts d'états de surface :*

L'aptitude d'une pièce à remplir une fonction donnée dépend de nombreux facteurs, notamment des caractéristiques de son état de surface. L'état de surface est caractérisé par la micro géométrie de la surface, qui joue un rôle important dans certaines fonctions telles que le frottement, le glissement, le roulement, l'étanchéité, parfois même l'aspect.

Pour que les pièces puissent être contrôlées, il faut chiffrer les caractéristiques d'une surface.

La définition des caractéristiques d'une surface se fait sur un profil de cette surface.

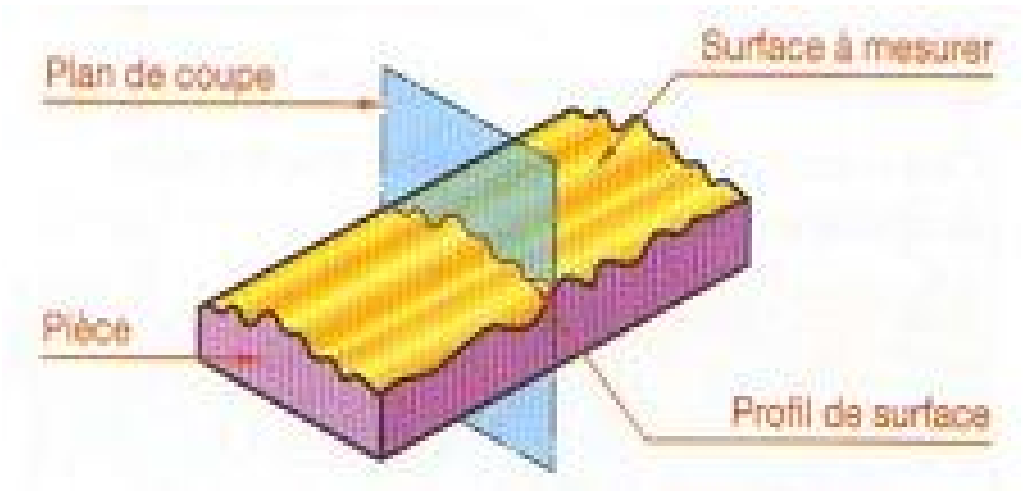



***Figure II.1*** *Profil de surface [7]*

La norme NF E 05-515 distingue six ordres de défauts de surface, du plus grand au plus petit :

1. Écart de forme (échelle macroscopique) : défaut de planéité, de rectitude, de circularité.
2. Ondulation (échelle macroscopique) : l'écart entre les crêtes est compris entre 0,5 et 2,5mm
3. Stries et sillons (défauts périodiques ou pseudopériodiques, échelle microscopique) l'écart entre les crêtes est inférieur ou égal à 0,5 mm.
4. Défauts localisés (échelle microscopique) : marque d'outil, arrachement, fente, piqûre
5. Structure cristalline (échelle méso-scopique).
6. Réseau cristallin (échelle nano-scopique) **[10]. [11]**

Les types de défauts de surface sont présentés dans la figure II.2

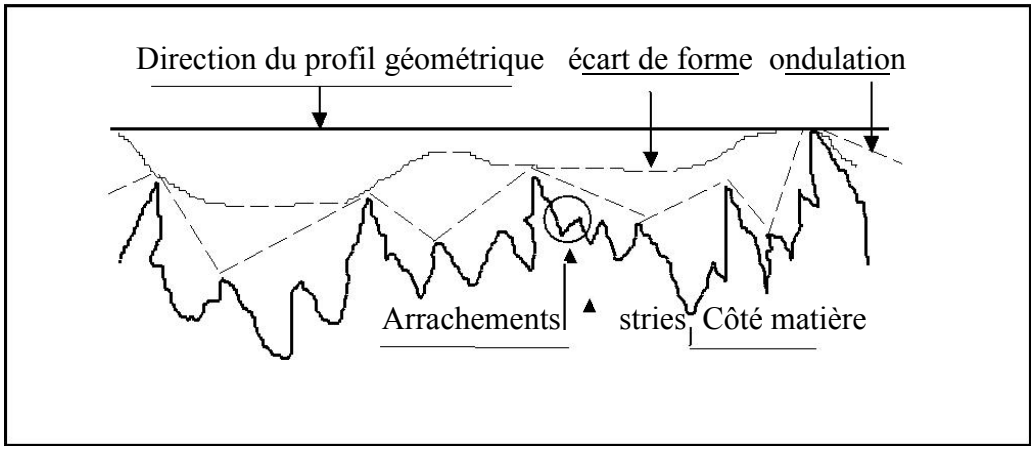



***Figure II.2*** *Les types de défauts de surface [7]*

## ***II.3.1 Ordre 1 : défauts de forme : ordre 1 :***

macro géométrique: l'écart de forme

- Les défauts de planéité
- Les défauts de rectitude
- Les défauts de circularité

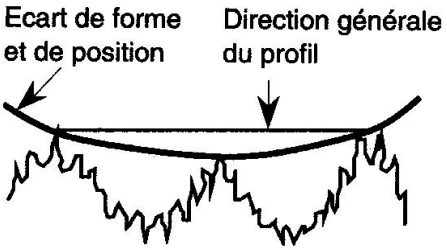



***Figure II.3****Défauts d'ordre 1[7]*

L'influence de ces défauts à lieu au niveau de :

- L'étanchéité : Statique (pas de mouvement entre les pièces
- Dynamique (mouvement entre deux pièces)
- Les frottements : Roulement, Glissement *S* Durée de vie des organes

Les causes de ces défauts sont :

- La déformation de la pièce avant usinage dans son système d'ablocage *S* La déformation de la pièce au cours de l'usinage due à l'effort exercé par L'outil sur la pièce ou due à la mauvaise inclinaison de l'outil.
- La déformation de la pièce après démontage (contraintes internes (ex : Température)
- La déformation de l'outil machine due à l'action de la pièce sur l'outil.
- Les défauts au niveau des guidages.
- L'évaluation de la surface :

Discontinue: Comparateur (maillage) Machine à mesurer tridimensionnelle Continue : Palpage, interférométrie

On peut également utiliser un marbre ou calibre ou une bague **[10]. [11]**

## *II .3.2 Ordre 2 : défauts macrographiques, ondulation :*

Ils sont caractérisés par une longueur d'onde de quelques millimètres. Ils sont causés par des vibrations basses fréquences, des mouvements cycliques d'outils....

Pour faire apparaître, on utilise un filtre passe bas qui ne laisse passer que les longueurs d'onde $\lambda > \lambda_w$ (valeur à déterminer avec le bureau d'étude)

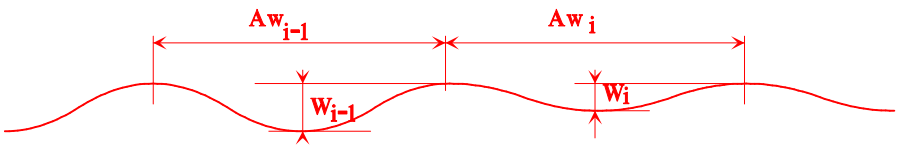



***Figure II.4****motif d'ondulation*

Pas moyen d'ondulation : $A_W = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} A_{Wi}$

Profondeur moyenne d'ondulation $W = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} W_i$

L'influence de ces défauts est le même que pour l'ordre 1

Les causes de' ces défauts sont les phénomènes vibratoires basse fréquence, ces derniers se traduisent par un manque de rigidité au niveau de :

La pièce, due à un mauvais équilibrage du montage sur le porte pièce

L'outil, dû à une dent cassée au niveau de la fraise par exemple La machine. **[2]**

## *II .3.3 Ordre 3 : défauts micrographiques, rugosité :*

Ils sont caractérisés par une longueur d'onde comprise entre 2/100 de millimètre et quelques 1/10 de millimètre. Ils sont causés par des vibrations haute fréquence, les traces des dents

Pour les faire apparaître on utilise un filtre passe haut qui ne laisse passer que les longueurs d'onde $\lambda < \lambda_r$ (valeur à déterminer avec le bureau d'étude)

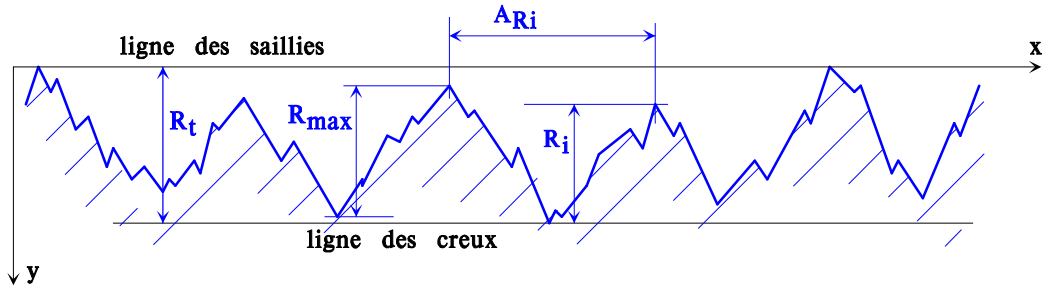



**Figure II.5***Profil « redressé »*

Pas moyen de rugosité : $A_R = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} A_{Ri}$, **<u>Profondeur moyenne de rugosité</u>** $R = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} R_i$

**<u>Rugosité maxi</u>**: $R_{max} = \mathrm{Sup}\{R_i\}$, **<u>rugosité totale</u>** : $R_t$ = Ecart entre le pic le plus haut et la saillie la plus basse

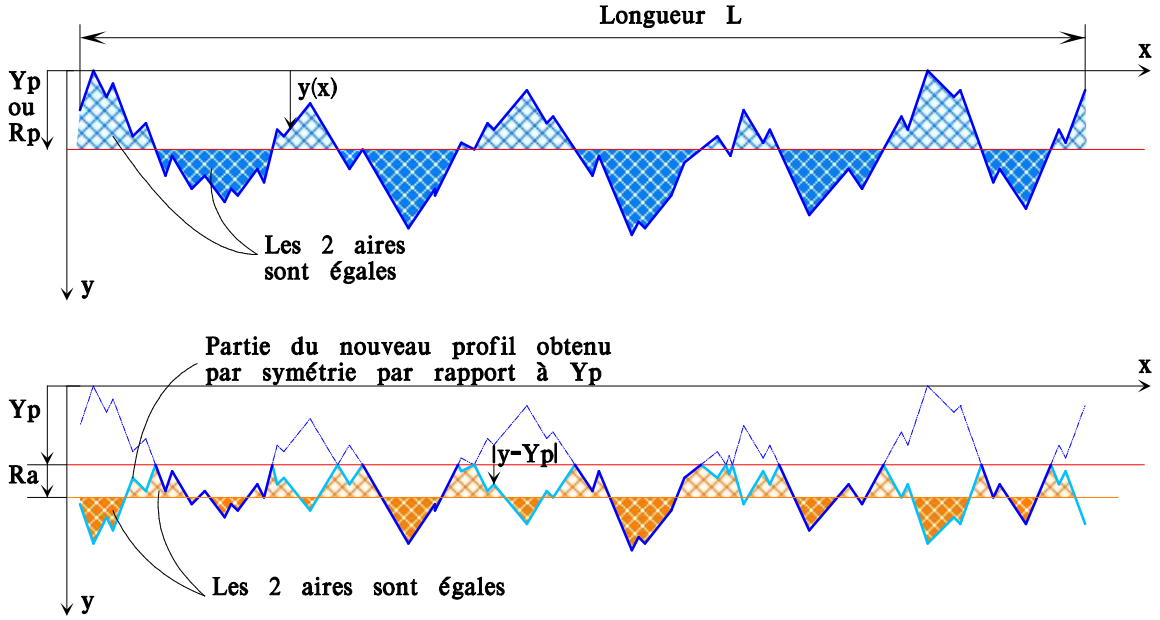



***Figure II.6*** *profondeur d'aplanissement de rugosité : $R_p$ ; écart moyen par rapporte à la linge moyenne de rugosité : $R_a$ [7]*

Profondeur (ou rugosité) moyenne d'aplanissement : $Y_P \text{ ou } R_P = \frac{1}{L}\int_L y(x).dx$

**<u>Écart arithmétique moyen</u>** (par rapport à la ligne moyenne d'aplanissement) :

$$R_a = \frac{1}{L}\int_L |y(x) - Y_P|.dx$$

L'influence de ces défauts à lieu au niveau de :

L'étanchéité : Statique (pas de mouvement entre les pièces) Dynamique (mouvement entre deux pièces)

- Les frottements fluides
- Les problèmes de revêtement (peinture...)

Les causes de ces défauts sont :

Les phénomènes vibratoires hauts fréquence

Les stries ou sillons dus au passage de l'outil (r). **[10]**

## *II .3.4 Ordre 4 : arrachement de matière :*

Dépend de l'affûtage de l'outil, du type d'outil, de la lubrification, de la vitesse de coupe, de la géométrie de l'outil de coupe, du matériau de l'outil (carbure revêtu...)

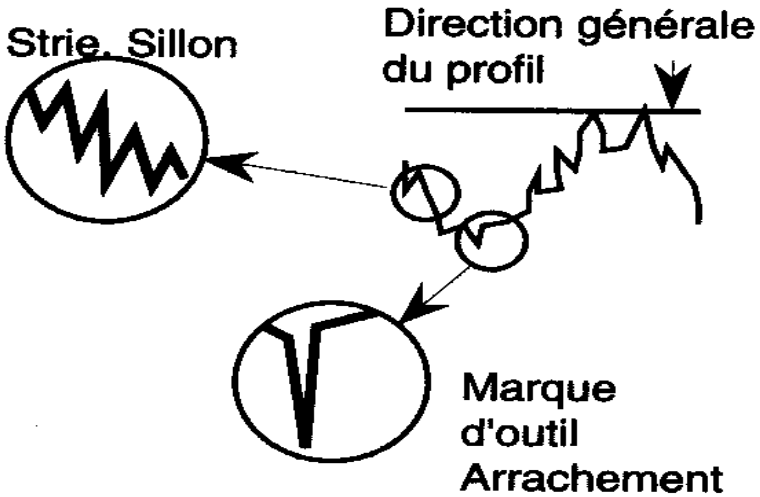



***Figure II.7*** *arrachement de matière***[7]**

## *II.4 Différents types de lignes :*

La direction générale du profil est équivalente à la ligne des moindres carrés du profil.

- **Ligne moyenne:**

Cette droite a la direction générale du profil

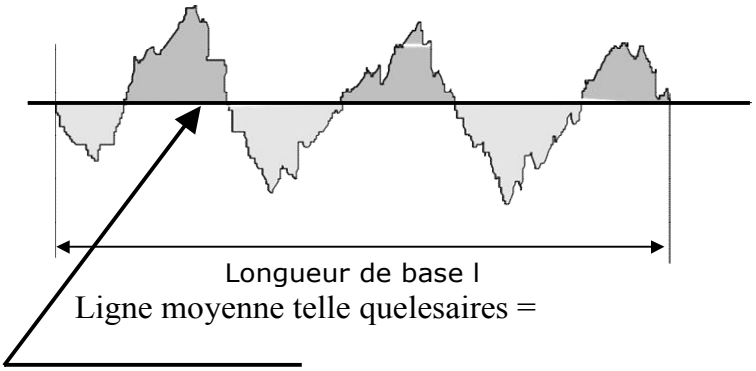



**Figure II.8 la ligne moyenne [7]**

## ***II .4.1 Longueur de base, d'évaluation :***

- ***Longueur d'évaluation :*** c'est la longueur , mesuré suivant la droite d'orientation générale , de la partie de profil utilisée pour le calcul des paramètres caractéristiques

- ***Longueur de base :*** c'est une partie de la longueur de base qui sert à séparer les irrégularités du profil . L = n ×1 avec n entier

En principe la longueur 1 est telle que 2 1 # période de l'ondulation. Donc

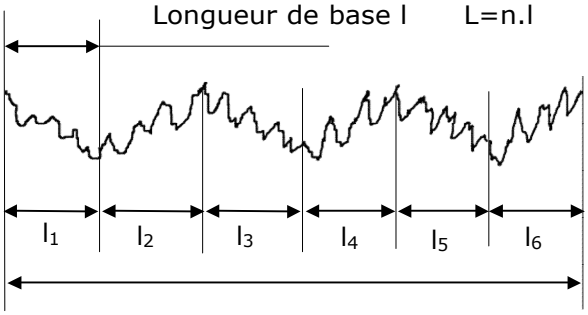



***Figure II.9*** *la présentation de la longueur de base [7]*

## ***II .4.2 Ligne de référence :***

C'est la linge par rapport à laquelle les paramètres du profil seront déterminés. En général, cette ligne n'appartient pas à la surface de référence est lalinge moyenne. elle peut être définie de façons ;

- Ligne des moindres carrés à l'intérieur de la longueur de base

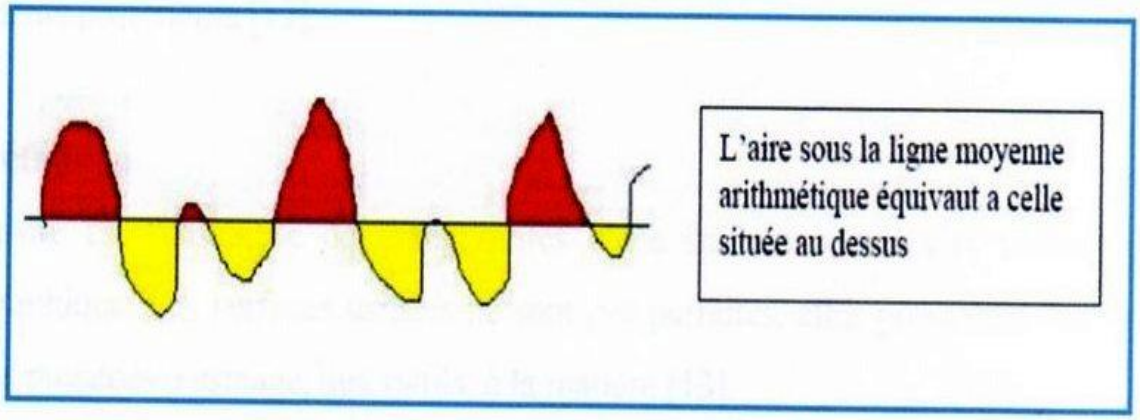



***Figure II.10****Ligne des moindres carrés [8]*

- Ligne centrale arithmétique à l'intérieur de la longueur de base. la somme des aires comprises entre elle et le profil est égale de parte et d'autre **[11]**

## ***II .4.3 La ligne enveloppe supérieure :***

C'est la somme des segments de droite qui joignent les points les plus hauts des saillies Locales du profil. **[11]**

## ***II.4.4 La ligne enveloppe inférieure :***

C'est la somme des segments de droite qui joignent les points les plus bas des creux locaux du Profil. Le problème est que tous les points ne sont pas pris en compte (très aléatoire). **[10]**

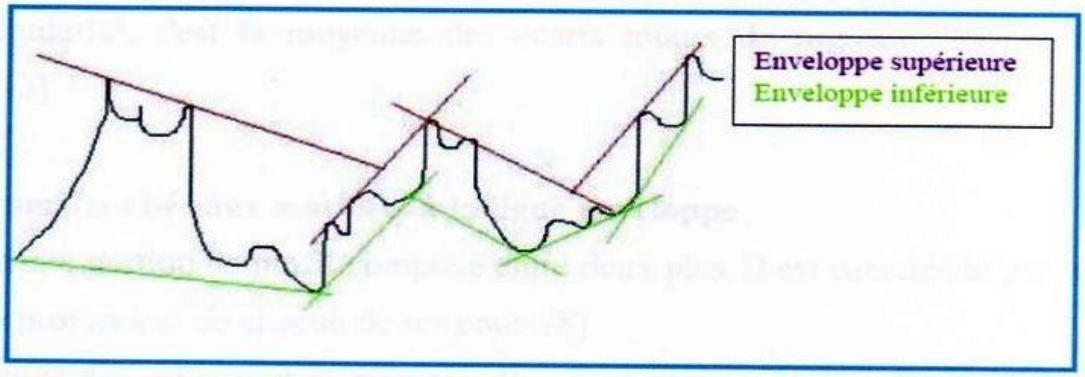



***Figure II.11*** *ligne enveloppe inférieure et supérieure [8].*

## *II .5 Paramètres de rugosité uni-dimensionnelle :*

Les paramètres de rugosité uni-dimensionnelle standardisés peuvent être évalués avec l'outil rugosité.
La texture uni-dimensionnelle est séparée en ondulation (la composante de basse fréquence définissant la forme globale) et la rugosité (la composante de haute fréquence) à la fréquence de coupure. Celle-ci est spécifiée en unités de fréquence de Nyquist, c'est-à-dire qu'une valeur de 1.0 correspond à la fréquence de Nyquist.

Dans les formules qui suivent, nous supposons que la valeur moyenne de $r_j$ est nulle, c'est-à-dire que nous avons **[11]**

$$r_j = z_j - \bar{z}$$

### *II.5.1 Paramètres d'amplitude de rugosité :*

Il existe un grand nombre de paramètres pour la définition de la rugosité, certains sont pourtant beaucoup plus employés que d'autres:

- **Rugosité moyenne $R_a$**

  Normes : ASME B46.1-1995, ASME B46.1-1985, ISO 4287-1997, ISO 4287/1-1997.

  Ecart moyen arithmétique. Il s'agit de l'écart moyen de tous les points du profil de rugosité par rapport à une ligne moyenne sur la longueur d'évaluation

$$R_a = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}|r_j|$$

  Une manière plus ancienne de spécifier une plage de $R_a$ s'appelle RHR. Il s'agit d'un symbole placé sur un dessin et spécifiant la valeur minimale et maximale de $R_a$.**[10]**

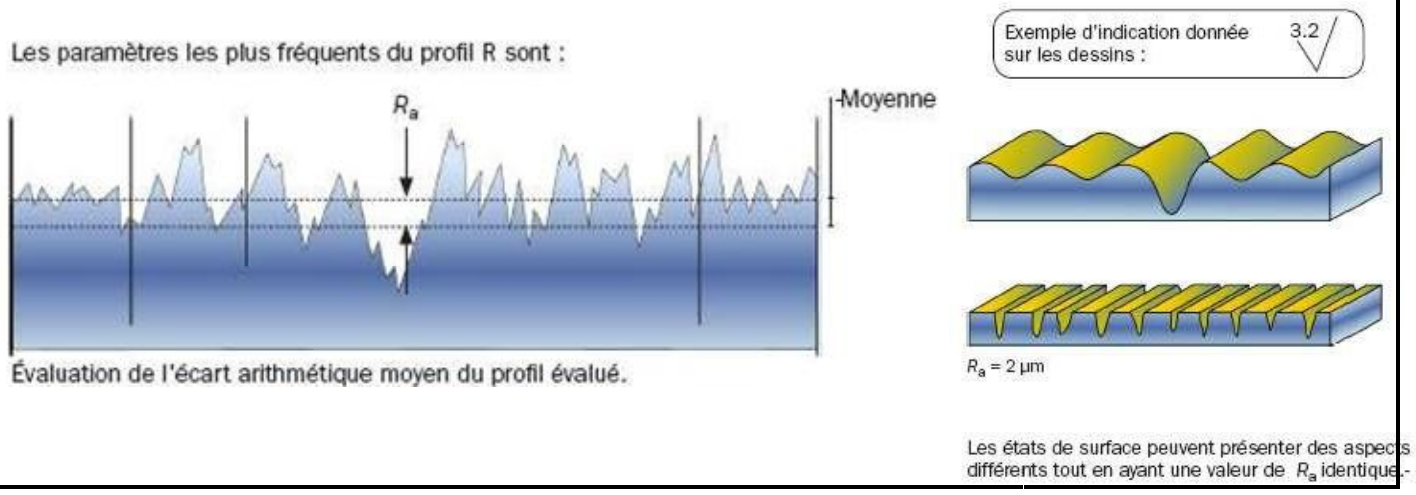


***Figure II.11*** *rugosité moyenne $R_a$[6]*

- **Rugosité moyenne quadratique $R_q$**

Normes : ASME B46.1-1995, ISO 4287-1997, ISO 4287/1-1997.

Moyenne quadratique des écarts de hauteur sur la longueur d'évaluation et mesurés par rapport à la ligne moyenne. **[10]**

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} r_j^2}$$

- **Hauteur maximale du profil $R_t$**

Normes : ASME B46.1-1995, ISO 4287-1997.

Hauteur crête-à-crête maximale. Il s'agit de la valeur absolue entre les hauteurs maximum et minimum. **[10]**

$$R_t = \left|\min_{1\le j\le N} r_j\right| + \left|\max_{1\le j\le N} r_j\right|$$

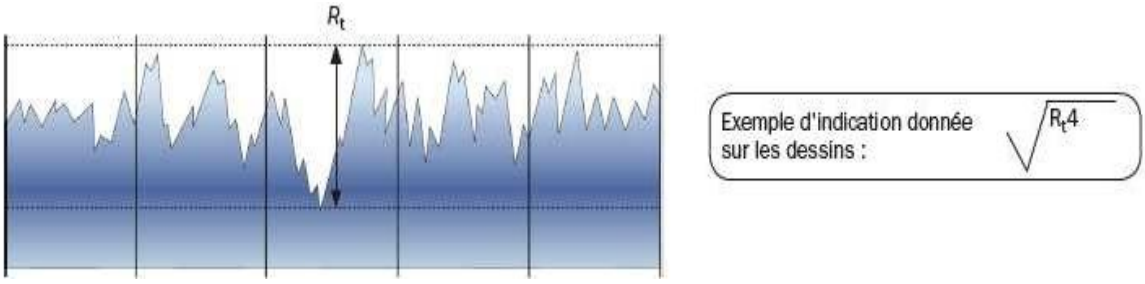



***Figure II.12.****Hauteur maximale du profil $R_t$ [6]*

- **Profondeur minimale des vallées $R_v$, $R_m$**

Normes : ASME B46.1-1995, ASME B46.1-1985, ISO 4287-1997, ISO 4287/1-1997.

Vallée la plus profonde. Il s'agit de la profondeur de la vallée la plus profonde du profil de rugosité sur la longueur d'évaluation. **[10]**

$$R_{\mathrm{v}} = \left| \min_{1 \le j \le N} r_j \right|$$

- **Hauteur maximale des pics $R_{\mathrm{p}}$**

Normes : ASME B46.1-1995, ASME B46.1-1985, ISO 4287-1997, ISO 4287/1-1997.

Pic le plus élevé. Il s'agit de la hauteur du pic le plus élevé du profil de rugosité sur la longueur d'évaluation [**10**]

$$R_{\mathrm{p}} = \left| \max_{1 \le j \le N} r_j \right|$$

- **Amplitude moyenne $R_{tm}$**

Normes : ASME B46.1-1995, ISO 4287-1997.

Rugosité crête-à-crête moyenne. Elle est déterminée par la différence entre le pic le plus élevé et la vallée la plus profonde sur plusieurs échantillons le long de la longueur d'évaluation

$$R_{\mathrm{t}m} = R_{\mathrm{v}m} + R_{\mathrm{p}m}$$

où $R_{vm}$ et $R_{pm}$ sont définis plus bas.

Pour les profils de données elle est basée sur cinq longueur d'échantillon ($m$ = 5). Le nombre d'échantillons correspond à la norme ISO. **[10]**

- **Profondeur moyenne des vallées $R_{vm}$**

Normes : ISO 4287-1997.

Profondeur de vallée moyenne basée sur une vallée par longueur échantillonnée. La vallée la plus profonde est déterminée pour cinq longueurs échantillonnées ($m$ = 5) puis ces valeurs sont moyennées. **[10]**

$$R_{\mathrm{v}m} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} R_{\mathrm{v}i}$$

où

$$R_{\mathrm{v}i} = |\min r_j| \quad \text{for} \quad (i-1)\frac{N}{m} < j < i\frac{N}{m}$$

- **Hauteur moyenne des pics $R_{pm}$**

Normes : ISO 4287-1997.

Hauteur de pic moyenne basée sur une vallée par longueur échantillonnée. La vallée la plus profonde est déterminée pour cinq longueurs échantillonnées ($m = 5$) puis ces valeurs sont moyennées. **[10]**

$$R_{pm} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} R_{pi}$$

ou

$$R_{pi} = |\max r_j| \quad \text{for} \quad (i-1)\frac{N}{m} < j < i\frac{N}{m}$$

- **Profondeur de rugosité de base $R_{3z}$**

Normes : ISO 4287-1997.

Distance entre le troisième plus haut pic et la troisième plus basse vallée. Un pic correspond à une portion de la surface située au-dessus de la ligne moyenne.**[10]**

- **Profondeur de rugosité moyenne $R_{3zISO}$**

Normes : ISO 4287-1997.

Distance entre le troisième plus haut pic et la troisième plus basse vallée par longueur échantillonnée. La profondeur de rugosité de base est déterminée pour cinq longueurs échantillonnées puis les valeurs obtenues sont moyennées.**[10]**

- **Hauteur maximale moyenne $R_z$**

Normes : ISO 4287-1997

Moyenne des valeurs absolues des cinq plus hauts pics et des cinq plus basses vallées sur la longueur d'évaluation. **[10]**

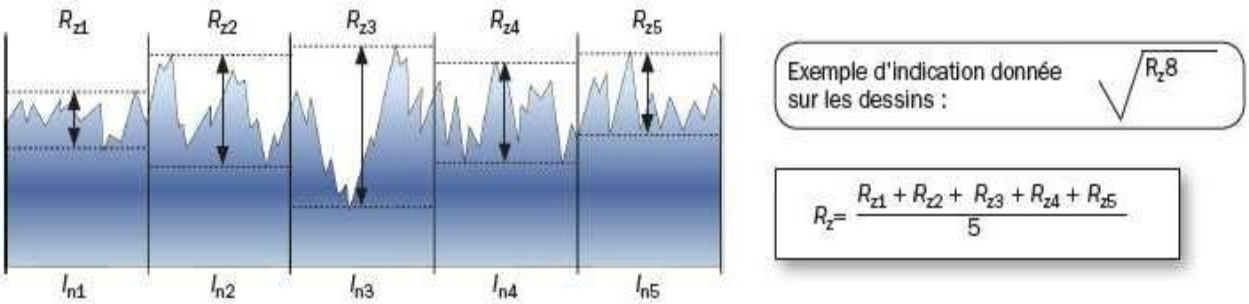



***Figure II.13****Hauteur maximale moyenne $R_z$[6]*

- **Amplitude crête-à-crête moyenne $R_{zISO}$**

Normes : ISO 4287-1997.

Rugosité crête-à-crête moyenne basée sur un pic et une vallée par longueur échantillonnée. L'amplitude la plus élevée est déterminée pour cinq longueurs échantillonnées puis ces valeurs sont moyennées. Elle est identique à $R_{tm}$.

Fonction de distribution d'amplitude

Normes : ISO 4287-1997.

La distribution d'amplitude est une fonction de donnant la probabilité qu'un profil de la surface ait une certaine hauteur $z$ pour toute position $x$.

Distribution d'amplitude cumulée

Normes : ISO 4287-1997.

La distribution d'amplitude cumulée est liée à la distribution d'amplitude, il s'agit de la distribution de probabilité cumulée correspondante et elle a un intérêt bien plus grand pour caractériser un état de surface. La distribution d'amplitude cumulée est l'intégrale de la distribution d'amplitude.**[10]**

- **Asymétrie $R_{sk}$**

Normes : ISO 4287-1997.

L'asymétrie est un paramètre décrivant la forme de la distribution d'amplitude. Il s'agit d'une mesure de la symétrie de la variation d'un profil autour de sa ligne moyenne**[10]**

$$R_{\mathrm{sk}} = \frac{1}{N R_q^3} \sum_{j=1}^{N} r_j^3$$

## ***II.5.2 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.**[10]**

## *II .5.3 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 [4],

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

Ces motifs déterminent la profondeur moyenne de rugosité R et son pas moyen AR voir figure II.15

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

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

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 II.15.

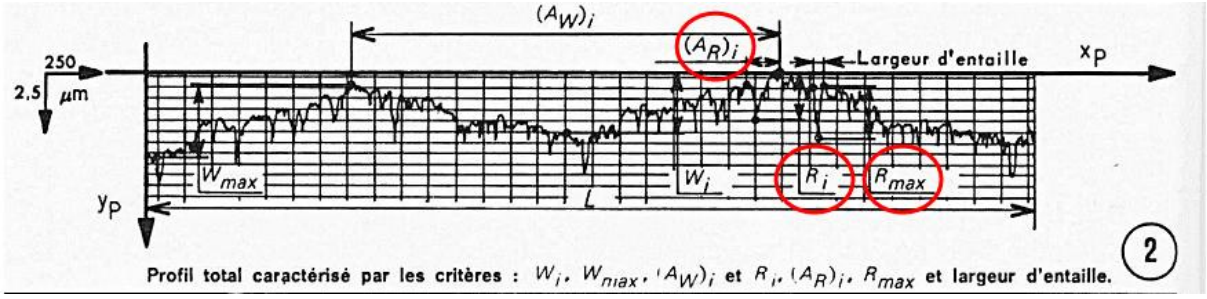



***figure II.15*** *profil total caractérisé par les critères :* $W_i, W_{max}, A_W)_i$ *et* $R_{max}$ *et largeur d'entaille [7]*

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

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

## *II .5.4 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 :**

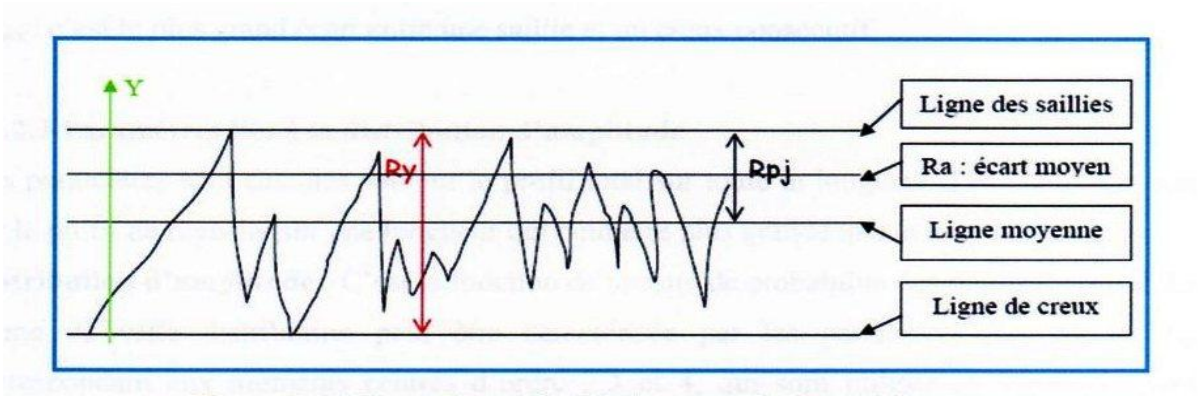



***Figure II.16*** *Paramètre lies a la longueur de bas [8]*

Rpj : distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne

Raj : écart moyen arithmétique du profil

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

Rp : Représente la moyenne des Rpj

$$Raj = \frac{1}{l}\int_0^1 \left|y(x)\right| . dx$$

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

Rmax : c'est le plus grand écart entre une saillie et un creux consécutif

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

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

- **Au niveau de la longueur d'évaluation**

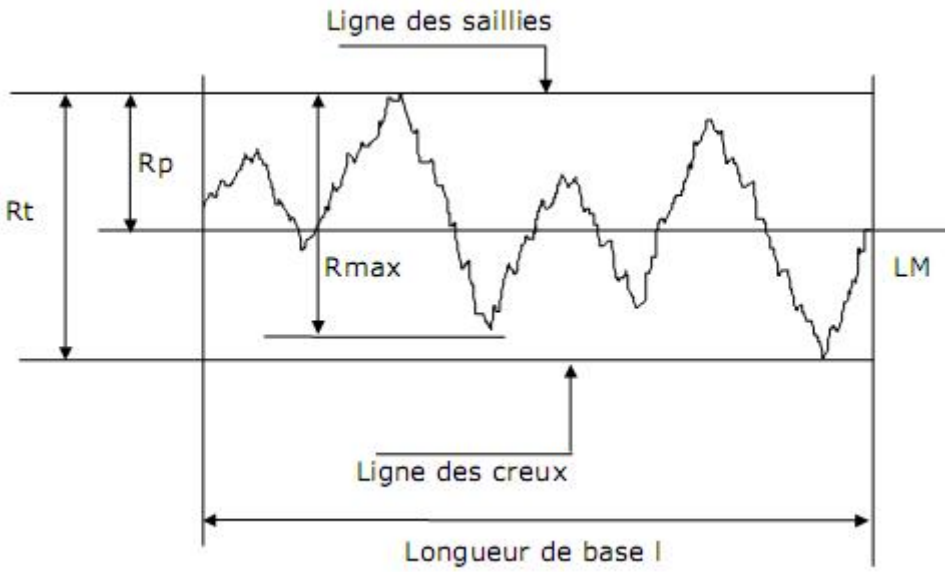



***Figure II.17*** *Paramètres liés à la longueur d'évaluation [7]*

- **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 []8,

Taux de portance Tp 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.

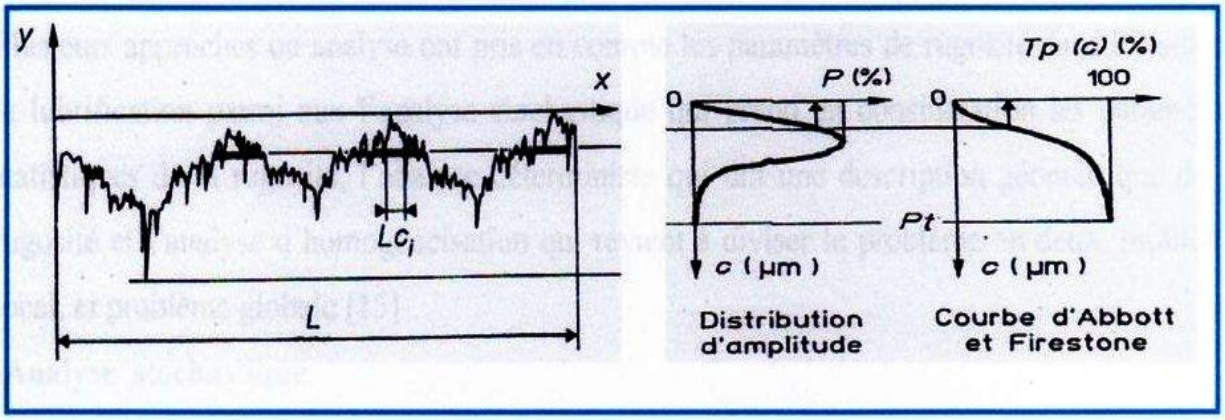



***Figure II.18*** *Paramètres liés à la distribution d'amplitude [8]*

C : (nm) 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 connaitre la topographie de surface est devenu un élément important en tribologie.

## ***II .6. Les spécifications normalisées :***

Sur les dessins de définition, les états de surface peuvent faire l'objet de spécification.
Un symbole graphique est utilisé :

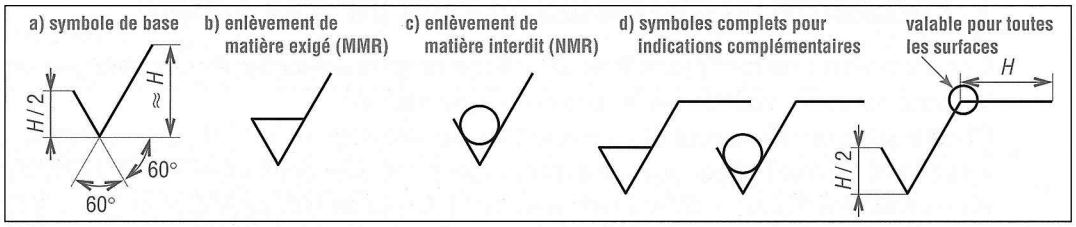



***Figure II.19*** symbole graphique de l'état de surface **[6]**

Ce symbole est complété d'indications relatives au paramètre de rugosité retenu, au procédé de fabrication éventuellement,…

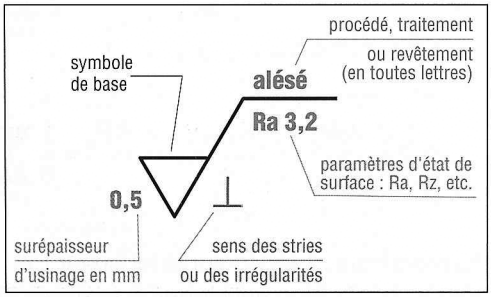



***Figure II.20****Exemple de symbolisation* **[6]**

## *II.7.Mesure de la rugosité :*

Lorsque les comparaisons visuelles et tactiles ne pas sont 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. **[6]. [11]**

***Figure II.22****Rugosimètre [1]*

## *II .8.Généralité sur les techniques d'amélioration des états de surface :*

## *II .8.1 .La Rectification :*

La rectification d'une pièce mécanique est une opération destinée à améliorer son état de surface.

Les deux techniques principales sont la rectification plane et cylindrique.

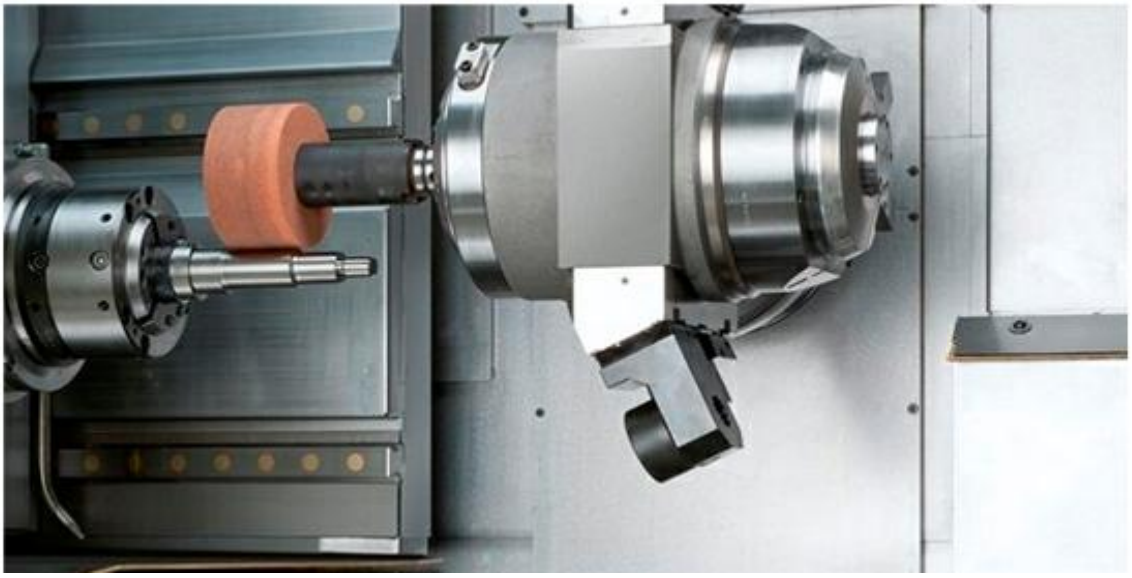


***Figure II.23****opération de la Rectification [6]*

## *II.8.2 Principe de La Rectification :*

La rectification s'effectue sur une machine-outil conçue à cet effet : la rectifieuse. Il s'agit de *rectifier* donc d'approcher une surface d'une forme parfaite (en général : plan, cylindre de révolution ou cône).

La rectification est souvent utilisée dans le but de préparer des surfaces frottantes, par exemple la portée d'un arbre qui tournera dans un palier lisse ou dans un joint d'étanchéité. Elle peut également être utilisée pour donner un profil particulier à la pièce lorsque la meule a été au préalable usinée au profil complémentaire.

La rectification plane consiste en un *meulage* horizontal de la pièce de façon à éliminer à plusieurs reprises des couches de matériau allant de 20 à 40 micromètres (0,0005 à 0,001 pouce). Ici, la pièce effectue un mouvement de va et vient longitudinal (qui peut être combiné à un balayage transversal pour rectifier une largeur supérieure à la largeur de la meule).

De même, la rectification double face consiste à rectifier les deux faces de la pièce en même temps.

Dans le cas de la rectification cylindrique, la pièce tourne sur elle-même en effectuant sa course parallèlement à l'axe de la meule.

Aujourd'hui, avec l'apparition des nouveaux procédés d'usinage à grande vitesse, on voit également apparaître un nouveau procédé appelé rectification grande vitesse.

Contrairement à l'usinage traditionnel (enlèvement de copeaux par outils coupant), la rectification permet des usinages de précision dimensionnelle élevée grâce au principe de l'usinage par abrasion. Dans la plupart des cas de rectification, les rectifieuses ont besoin d'utiliser un liquide de refroidissement et d'arrosage pour arroser la meule et les pièces afin ne pas faire des brulures sur les pièces produites ce liquide refroidi les pièces pour ne pas avoir un mauvais état de surface. **[13]**

- **Mâtereaux**

Il est possible de rectifier :

- Acier classique non trempé
- Acier trempé jusqu'à 70 HRC
- Acier chromé dur

- Céramique
- Carbure
- Plastique

## *II.8.3 Avantage de la rectification :*

- Possibilité de s'attaquer aux matériaux les plus durs
- Pouvoir atteindre des tolérances dimensionnelles de l'ordre du micromètre (0,001 mm) et donc d'usiner des pièces plus précises
- Obtenir un état de surface poussé (< 0,1 Ra) **[12]**

## *II .8.4. Superfinition :*

La superfinition est une action d'usinage qui vise à obtenir des pièces de très haute qualité, au-delà des capacités de la rectification.

Elle opère sur deux caractères :

- la forme de la surface obtenue en définitive : l'usinage à l'outil laisse sur la surface un certain nombre de raies ou de stries (que le rodage masque partiellement).
- la structure superficielle du métal usiné : l'usinage à l'outil conduit à de grandes élévations de température pouvant atteindre 1 000 °C à l'extrémité de l'outil ; celui-ci arrache, d'autre part, des éléments de copeaux ; il en résulte une détérioration superficielle due à la fusion de particules de métal qui se ressoudent ensuite.

À cela s'ajoute l'agglutination de corps étrangers : limailles, lubrifiant, saletés, etc., qui contribuent à former une structure superficielle fragile et peu homogène, appelée couche de Beilby.

La superfinition consiste à enlever la couche de Beilby, de manière à faire disparaître les stries et les défauts géométriques

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 pierre abrasive à mouvement rectiligne alternatif. Ce mouvement de vibration a une fréquence d'environ 25 coups par seconde et une amplitude de 1 à 5 mm. L'abrasif travaille à faible vitesse (10 à 20 m/min, contre 3000 m/min en polissage). **[13]**

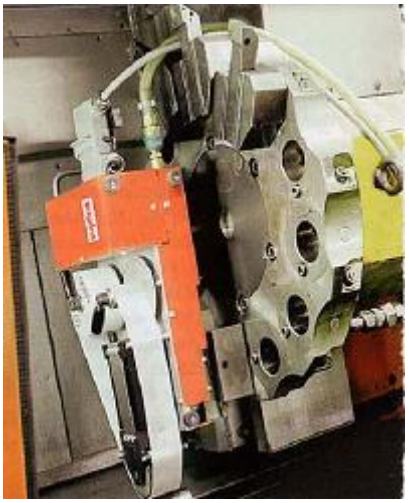


***Figure II.24****opération de superfinition [10]*

## *II .8.5. Galetage :*

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...

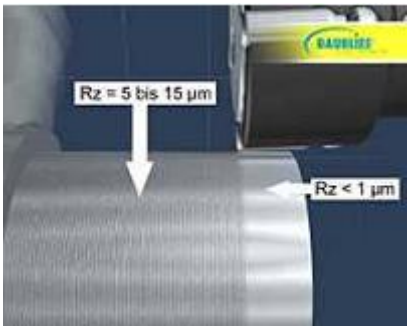



***Figure II.25****opération de galetage [1]*

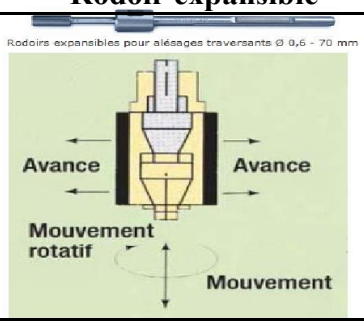
## *II .8.6.Rodage :*

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 préalable.

| **Rodoir expansible** | **Mandrin pour rodoir expansible** | **Machine à roder** |
|---|---|---|
|   | | |
| Les rodoirs Diamant Permettent l'usinage de toutes les matières (acier trempé, acier non trempé, carbure, titane, aluminiu | Les têtes micrométriques, d'un maniement très simple et d'une mise en œuvre rapide, s'utilisent sur toutes Machines telles que perceuses, | |

| | | |
|---|---|---|
| m,<br>céramique, verre, etc ...) avec des<br>états de surface très poussés. | fraiseuses, tours ainsi que sur les machines à roder. | |

***II.1.****Tableau des types de rodage* **[1]**

## *II .9.Avantages de la lubrification :*

***Figure II.25****liquide de coupe [11]*

Un liquide de coupe, et plus généralement un fluide d'usinage, est un liquide refroidissant et lubrifiant conçu spécialement pour le travail et l'usinage des métaux. Il existe différents types de fluides d'usinage, parmi lesquels on retrouve les huiles, les émulsions, les aérosols, l'air et d'autres gaz. L'utilisation de ces fluides améliore le travail et les procédés d'usinage des matériaux métalliques. Deux exceptions existent cependant : la fonte et le laiton qui sont usinés à sec.

On fait appel à un fluide d'usinage pour :

- maintenir la pièce en cours de travail à une température stable (fonction critique lorsque les tolérances de fabrication sont réduites).
- maximiser la durée de vie de l'outil de coupe en lubrifiant l'arête de coupe et en réduisant le phénomène de copeau rapporté
- prévenir l'usure de la machine utilisée
- assurer aux opérateurs de bonnes conditions de travail **[14]**

### *II.9.1 Maintien en température :*

Le travail des métaux génère de la chaleur à cause du frottement de l'outil sur la pièce et de l'énergie dissipée par la déformation du matériau. L'air ambiant est un mauvais refroidisseur pour l'outil de coupe car il conduit peu la chaleur (conductivité thermique faible). **[14]**

### *II.9.2 Lubrification :*

En plus du refroidissement les liquides de coupe aident l'usinage en lubrifiant l'interface entre l'outil et la pièce . En diminuant le frottement à cette interface, ils diminuent la création de chaleur. Cette lubrification permet également de prévenir l'adhésion du copeau sur l'outil qui risquerait d'affecter la surface usinée. **[14]**

## *II .9.3 Évacuation des copeaux :*

Dans l'industrie de grande série, le liquide de coupe permet également d'évacuer les copeaux de la zone de coupe vers un dispositif de centralisation des copeaux. **[14]**

## *II.10Composition des fluides d'usinage :*

Les fluides d'usinage sont utilisés pour de très nombreuses opérations d'usinage, ce qui explique leurs compositions très variées. Ils sont en général élaborés par des formulateurs, qui font appel à de nombreux produits de base (composés type huile minérale, issus de la distillation du pétrole, graisses animales, huiles végétales ou autres matières premières).

On peut distinguer parmi ces fluides

- les huiles entières
- les fluides de type émulsion
- les fluides type micro-émulsion
- les fluides synthétiques

## *II.10.1 huiles entières :*

Huiles minérales, additives ou non

## *II.10.2 fluides de type émulsion :*

Les fluides de type émulsion contiennent en général:

- une base type huile minérale ou alkylbenzène
- un émulgateur
- un agent anti-corrosion
- des additifs type extrême pression
- des bactéricides et/ou des fongicides
- des agents anti-mousses
- de l'eau

Ces fluides sont fournis sous forme de concentrés qu'il faut diluer dans l'eau avant emploi (2 à 10 % habituellement). **[14]**

## *II.10.3 fluides de type micro-émulsion :*

Leur composition est assez voisine des fluides type émulsion. Ils comprennent en général :

- une base huile minérale ou alkylbenzène
- un émulgateuranti-corrosion
- des additifs antimousse
- des additifs extrême-pression (non obligatoirement)

- des bactéricides et/ou fongicides
- un solvant
- de l'eau

Ils sont fournis ici encore sous forme de concentrés à diluer dans l'eau (1,5 à 5 %). **[14]**

## ***II.10.4 fluides synthétiques :***

Risques liés aux fluides d'usinage.

Au cours de l'usinage, les fluides se chargent non seulement en métaux, plus ou moins solubilisés, mais aussi en composés indésirables (issus de la dégradation thermique du fluide) et, surtout en cas d'utilisation de fluides aqueux, en contaminants biologiques (moisissures, bactéries, etc.).

Les opérations d'usinage émettent des aérosols, dont l'inhalation peut être à l'origine de diverses affections respiratoires. On retrouve en effet dans l'air les composés évoqués ci-dessus, dont certains sont des cancérogènes [1] ou des allergisants respiratoires.

Par ailleurs, le contact cutané avec ces mêmes fluides est susceptible de provoquer des dermatites ou des lésions eczématiformes [2].

Il convient donc :

- de vérifier régulièrement la qualité des fluides utilisés.
- d'assainir les postes de travail, à l'aide notamment de ventilations efficaces.
- d'éviter tout contact cutané avec ces produits. **[14]**

# Chapitre III

# Partie Expérimentale

# III Partie expérimentale:

## III.1. expériences et machines-outils utilisés :

Cette série d'expérience concerne routage de deux arbres en acier de construction, avec un outil en carbure métallique. Les régimes de coupe employés sont la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (a). Les paramètres de sortie étant les composantes de coupe, surfaces obtenues « surfaces usinées ».

## III.2 Mâtereaux utilisé :

XC48

## III.2.1. analyse chimique moyenne :

| | C% | Mn % | Si % | S % | P % |
|---|---|---|---|---|---|
| XC 48 | 0,50 - 0,52 | 0,50 - 0,80 | 0,40 maxi | ≤ 0,035 | ≤ 0,035 |

***Tableau III .1*** *: composition chimique*

## III 2.2.Propriétés physique et mécanique :

Matière en œuvre : Acier de construction non allié XC48 Acier carbone à teneur plus élevée que pour les aciers C35 et C40, utilisée en mécanique générale de part sa bonne usinabilité et ses caractéristiques mécaniques et son apte aux traitements thermiques : ex. à l'huile 820 - 860°C

XC48 Acier mi-dur de haute qualité pouvant être utilisé à l'état traité ou recuit ou à l'état trempé (trempé superficielle).

- Domaines d'application :

Pièces soumises aux chocs et nécessitant une bonne résistance : axes, engrenages, vis sans fin, paliers, pignons, boulonnerie, forge (leviers, arbres)

Remarque : soudabilité médiocre (précautions nécessaires, préchauffage et revenu de stabilisation recommandés).

## III.2.3.Caractéristiques :

Etat normalisé :

| | Rm (N/mm²) | Re (N/mm²) | A % |
|---|---|---|---|
| XC 48 | 560 / 620 | 275 / 340 | 14 / 16 |

***Tableau III .2*** *: Caractéristiques mécaniques moyennes (état normalisé)*

## III.3. machine-outil utilisés :

Machine-outil utilisée, Tour universel

L'usinage a été réalisé au département génie mécanique, d'université Badji Mokhtar Annaba. On a utilise un tour universel de type :

**Tour modèle AI616 fabriqué en URSS**

## ***Caractéristiques techniques et dimensions :***

Encombrement 2135x1225x1220 mm.
Poids de la machine - 1500 kg.
Alésage de broche : 35 mm.
Diam. admis dans lerompu 660 mm.
Porte outils : 140 mm.
Moteur d'entraînement principal: tension - 220/380 V, vitesse - 1430 tr / min, puissance 4 kW, type - A02-41-4.
Diamètre Mandrin : 250.
La fréquence de rotation (avant et arrière) de la broche - de 9 à 1800 tr / min, le nombre d'étages – 21.

***Figure III.1 :*** *Tour universel modèle AI616 fabriqué en URSS*

## ***III.4.Outil de coupe utilisé:***

Outil à tronçonner et outil à charioter et dresser.

***Figure III.2 :*** Outil à tronçonner

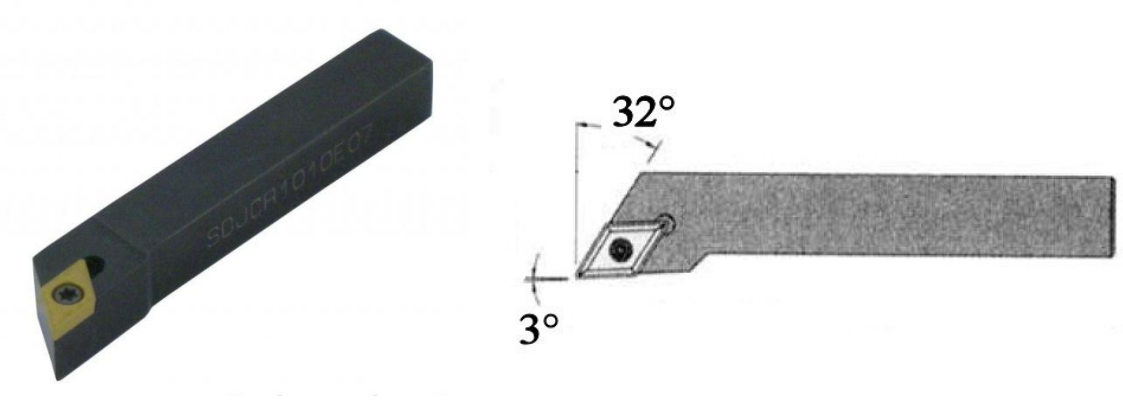



***Figure III.3 :*** Outil à charioter et dresser

## ***III 5.Régime de coupe :***

Le régime de coupe a été choisi en fonction du matériau utilisé et de l'outil de coupe employe lors de la réalisation de la pièce demandée. Les régimes de coupe adoptés dans cette dernière, sont consignés dans les tableaux ci-après.

## ***III 6.Présentation de l'éprouvette :***

L'éprouvette découpée respectivement au de diamètre D= 58mm (mise en longueur), et préparées en 6 paliers.

Les pièces de longueur L= 122mm et diamètre D= 51mm et réalisées en 6 paliers (1$^{ère}$ partie la pièce usinée sans lubrification, et 2$^{ème}$ Partie la pièce usinée avec lubrification). Largeur du palier 13mm, Séparé par des gorges de profondeur de 3mm et largeur de 3mm.

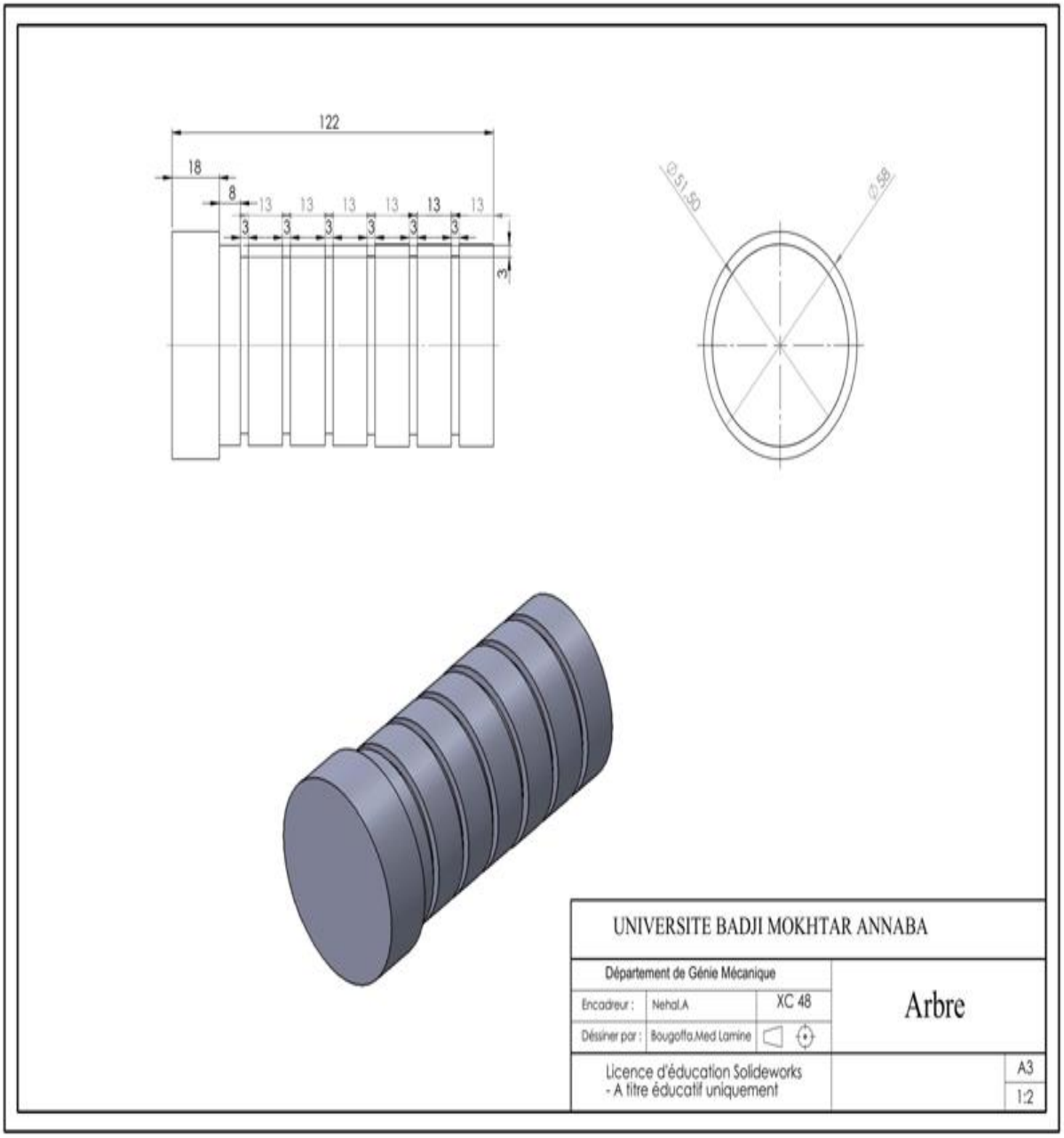



***Figure III.4.****dessin de définition de la pièce*

***Figure III.5.****la pièce*

## ***III.7.Rugosimètre utilisé :***

Pour la mesure des différents critères de rugosité (Ra, Rt et Rz), nous avons utilisé un rugosimètre TR220.

Le TR220 est le rugosimètre approprié aux mesures les plus exigeantes en raison de sa grande précision et de ses très nombreuses fonctions. Disposant de tous les outils des rugosimètres, le TR220 est idéal pour tester les applications critiques.

Le rugosimètre TR220 fonctionne avec un capteur inductif ayant une pointe en diamant. Les tensions sont générées lorsque le capteur est dévié par les anfractuosités du matériau à tester et sont convertis dans les différents paramètres de rugosité. Une courbe de l'essai est affiché directement sur le rugosimètre ce qui permet d'avoir un aperçu rapide de l'essai réalisé.

Le profil de la surface mesurée peut être affiché dans 13 caractéristiques différentes : Ra, Rz, Ry, Rq, Rt, Rp, Rmax, Rm, R3z, S, Sm, Sk, tp. L'interface RS232 permet le transfert du profil de surface et des caractéristiques vers l'imprimante TA-220 (disponible en option). Ils peuvent aussi être transférés sur un PC en utilisant en utilisant le logiciel TimeSurf, notamment pour la surveillance des produits de série.

## ***Caractéristiques techniques :***

a) Plage de mesure: Ra, Rq: 0.01à 40 µm; Rz, Rp, Rt, R3z: 0.02 à 160 µm: Sm, S: 2 à 4000 µm; Tp : 1 à 100% (% Ry).
b) Cut-off (longueur de mesure): 0.25 mm, 0.8 mm ou 2.5 mm.
c) Précision de la mesure: Selon ISO Classe 2.
d) Course: 17.5 mm.
e) Vitesse: 0.5 mm/s.
f) Filtre digital: RC, PC-RC, Gauss, D-P.
g) Capteur: Diamant, rayon 5 µm (pointe).
h) Température d'utilisation: 5 à 40°C.
i) Alimentation: Batterie litium, 1000 mAh.
j) Dimensions: 141 x 56 x 48 mm.
k) Poids: 440 g

***Figure III.06.*** *Dispositif pour mesurer la rugosité*

***Figure III.07.*** Capteur *de rugosimétre*

## ***III.8.Résultats expérimentaux :***

## ***III 8.1 La vitesse de coupe Vc :***

- La vitesse de coupe Vc : usinage à sec

$Vc = \frac{\pi.D.N}{1000}$ ;

*D= 58mm*

*Vc* : vitesse de coupe en (*m/min*).

*D* : diamètre en point d'usinage (*mm*).

*N* : vitesse de rotation de la broche (*tr/min*)

- Pour *N* = 355 *tr//min* :

$$Vc = \frac{3.14 \times 58 \times 355}{1000} = 64{,}65 \approx 65\ m/min$$

La vitesse de coupe Vc : usinage avec lubrification

$Vc = \frac{\pi.D.N}{1000}$ ;

*D= 58mm*

- Pour *N* = 185 *tr//min* :

$$Vc = \frac{3.14 \times 58 \times 185}{1000} = 33{,}69 \approx 34\ m/min$$

## ***III.8.2.Routage d'usinage***

Selon l'usinage del'opération de chariotage d'essai avec les paramètres indiqués dans le tableau ci-dessous nous permettent d'étudier la rugosité de surface obtenue en fonction de la vitesse de coupe (**Vc)**, de l'avance (f) et de la profondeur de passe (a) et la vitesse d'avance.

***Condition d'usinage :***

***Essai :***
Usinage à sec.

Condition d'usinage :

- L'avance $f$ variée.
- Vitesse de rotation N=355 tr/min.
- Profondeur de passe ap = 1 mm.

| Palier | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Vitesse N | 355 | 355 | 355 | 355 | 355 | 355 |
| Avance f | 0.037 | 0.091 | 0.22 | 0.52 | 0.60 | 0.76 |
| Nombre de passe | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Profondeur de passe | 1 mm | 1 mm | 1 mm | 1 mm | 1 mm | 1 mm |

***Tableau III .3 : Condition d'essai***

***Essai :***

Usinage avec lubrification

Condition d'usinage :

- L'avance $f$ variée.
- Vitesse de rotation N= 185 tr/min.
- Profondeur de passe ap = 0.5 mm.

| Palier | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Vitesse N | 185 | 185 | 185 | 185 | 185 | 185 |
| Avance f | 0.037 | 0.091 | 0.22 | 0.52 | 0.60 | 0.76 |
| Nombre de passe | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Profondeur de passe | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |

***Tableau III .4 : condition d'essai***

## ***Résultat obtenues***

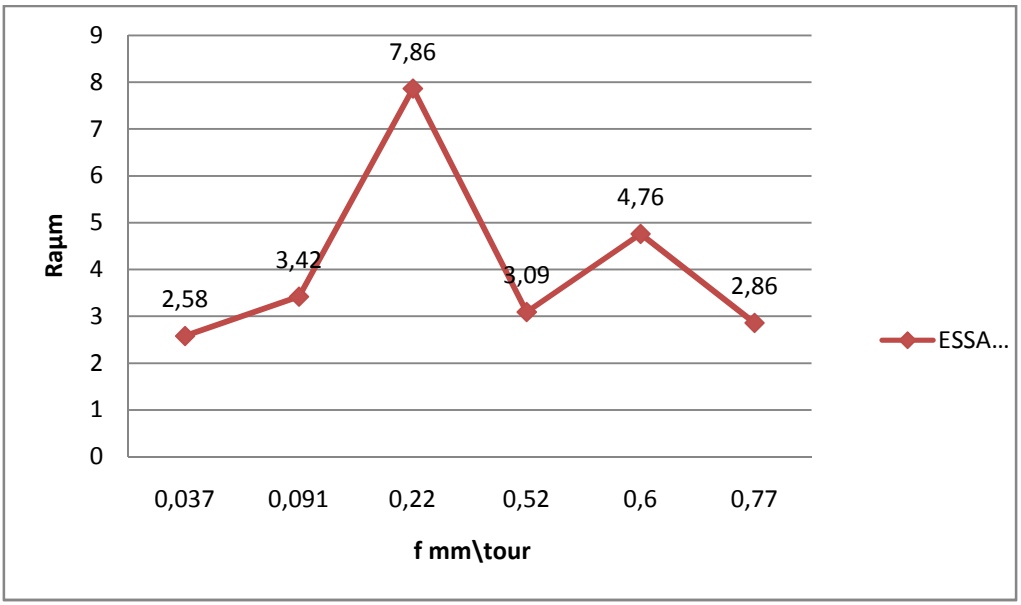
- ***Opération d'usinage : Sans lubrification***

***Essai :***
Usinage à sec.

- Condition d'usinage : L'avance $f$ variée.
- Vitesse de rotation N=355 tr/min.
- Profondeur de passe ap = 1 mm.

| Palier | Vc[m/min] | N, [tr/min] | f, [mm/tr] | a, [mm] | Mesure | $Ra_{\mu m}$ | $Ry_{\mu m}$ | $Rz_{\mu m}$ | $Rq_{\mu m}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 64.65 | 355 | 0.037 | 1 | 1 | 2.36 | 8.71 | 7.32 | 2 40 |
| | | | | | 2 | 2.50 | 9.30 | 7.25 | 2.87 |
| | | | | | 3 | 2.88 | 10.59 | 8.90 | 3.26 |
| | | | | | Moyenne | 2.58 | 9.53 | 7.82 | 2.84 |
| 2 | 64.65 | 355 | 0.091 | 1 | 1 | 3.08 | 10.64 | 9.02 | 3.41 |
| | | | | | 2 | 3.14 | 11.72 | 9.87 | 3.55 |
| | | | | | 3 | 4.06 | 12.30 | 11.88 | 4.45 |
| | | | | | Moyenne | 3.42 | 11.55 | 10.25 | 3.80 |
| 3 | 64.65 | 355 | 0.22 | 1 | 1 | 7.52 | 25.03 | 22.89 | 6.43 |
| | | | | | 2 | 8.27 | 26.75 | 24.33 | 9.18 |
| | | | | | 3 | 7.81 | 25.45 | 23.50 | 8.72 |
| | | | | | Moyenne | 7.86 | 25.74 | 23.57 | 8.11 |
| 4 | 64.65 | 355 | 0.52 | 1 | 1 | 3.14 | 12.04 | 9.19 | 3.69 |
| | | | | | 2 | 3.18 | 11.18 | 7.76 | 3.63 |
| | | | | | 3 | 2.95 | 11.09 | 7.95 | 3.45 |
| 5 | 64.65 | 355 | 0.60 | 1 | 1 | 4.75 | 12.77 | 9.43 | 4.49 |
| | | | | | 2 | 4.84 | 11.68 | 8.48 | 5.35 |
| | | | | | 3 | 4.69 | 11.87 | 8.66 | 3.76 |
| | | | | | Moyenne | 4.76 | | | |
| 6 | 64.65 | 355 | 0.77 | 1 | 1 | 2.67 | 12.04 | 8.94 | 2.56 |
| | | | | | 2 | 3.09 | 13.25 | 10.43 | 2.94 |
| | | | | | 3 | 2.83 | 12.79 | 8.46 | 2.38 |
| | | | | | Moyenne | 2.86 | | | |
| | | | | | Moyenne | 3.09 | 11.43 | 8.30 | 3.59 |

***Tableau III.5 :*** *Tableau des valeurs de rugosité (Ra) relevées lors de l'usinage a sec.*




Graphe III .1 variation de la rugosité (Ra) en fonction de l'avance (f) lors de l'usinage à sec.

- ***Opération d'usinage : Avec lubrification***

***Essai :***

Usinage avec lubrification

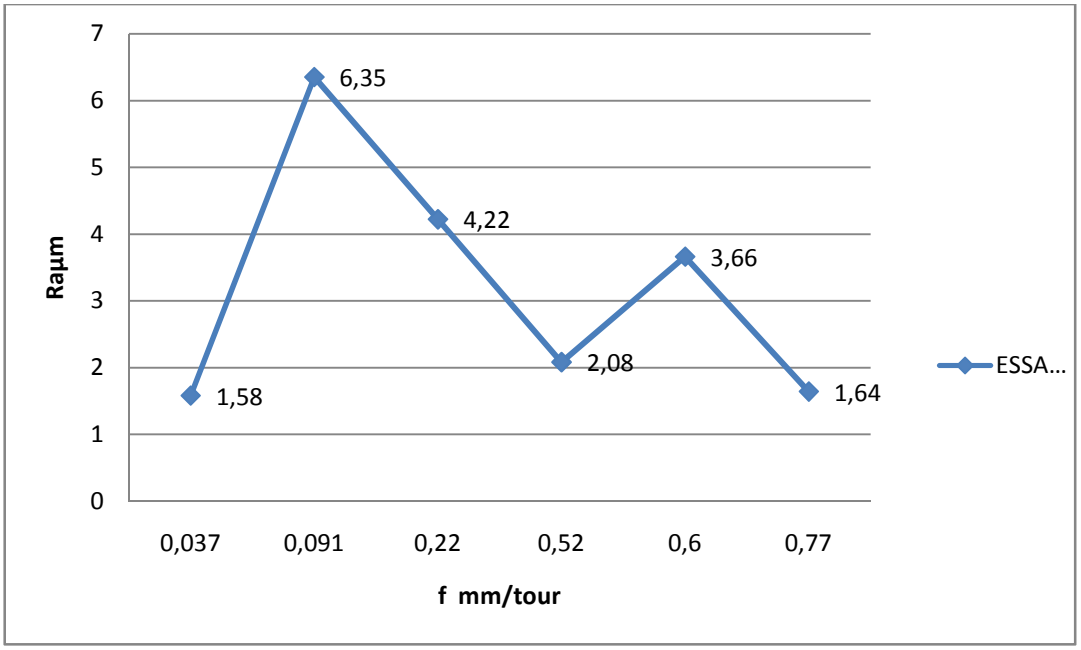
Condition d'usinage :

- L'avance $f$ variée.
- Vitesse de rotation N= 185 tr/min.

- Profondeur de passe ap = 0.5 mm.

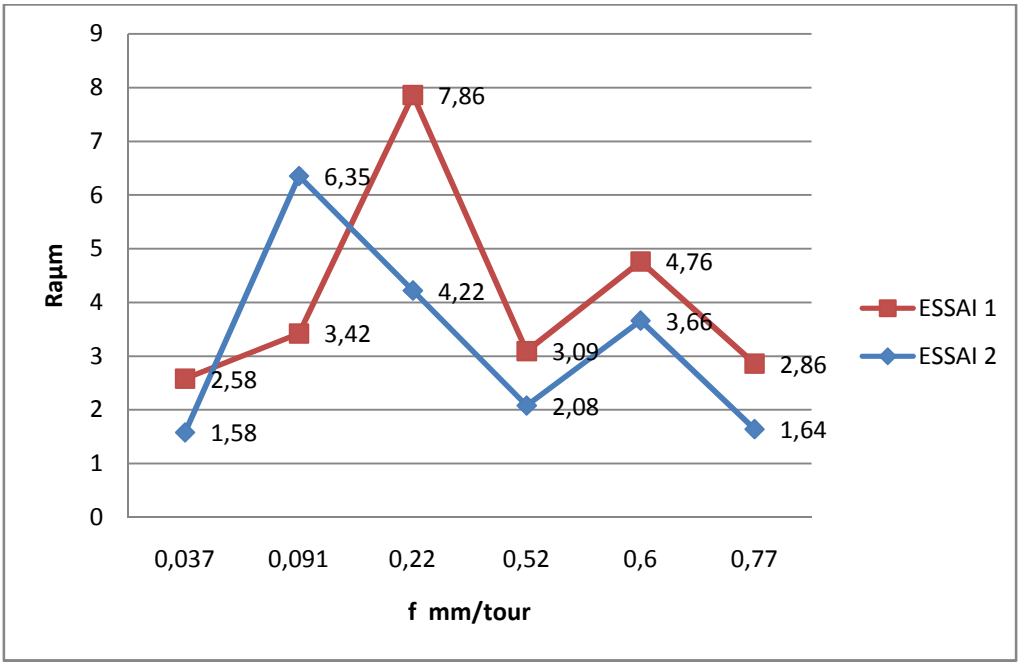
| Palier | Vc[m/min] | N, [tr/min] | f, [mm/tr] | a, [mm] | Mesure | $Ra_{\mu m}$ | $Ry_{\mu m}$ | $Rz_{\mu m}$ | $Rq_{\mu m}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 33.69 | 355 | 0.037 | 0.5 | 1 | 1.50 | 7.36 | 4.56 | 1.83 |
| | | | | | 2 | 1.95 | 8.35 | 5.64 | 2.29 |
| | | | | | 3 | 1.30 | 5.83 | 4.02 | 1.44 |
| | | | | | Moyenne | 1.58 | 7.18 | 4.74 | 1.85 |
| 2 | 33.69 | 355 | 0.091 | 0.5 | 1 | 6.10 | 20.07 | 18.37 | 6.83 |
| | | | | | 2 | 6.78 | 22.25 | 20.03 | 7.52 |
| | | | | | 3 | 6.17 | 20.28 | 17.45 | 6.85 |
| | | | | | Moyenne | 6.35 | 20.86 | 18.61 | 6.91 |
| 3 | 33.69 | 355 | 0.22 | 0.5 | 1 | 4.17 | 14.75 | 13.50 | 4.73 |
| | | | | | 2 | 4.09 | 15.40 | 14.68 | 4.76 |
| | | | | | 3 | 4.40 | 16.32 | 15.35 | 5.05 |
| | | | | | Moyenne | 4.22 | 15.49 | 14.51 | 4.84 |
| 4 | 33.69 | 355 | 0.52 | 0.5 | 1 | 2.11 | 8.04 | 5.95 | 2.40 |
| | | | | | 2 | 2.09 | 7.98 | 6.33 | 2.36 |
| | | | | | 3 | 2.06 | 8.06 | 6.31 | 2.35 |
| | | | | | Moyenne | 2.08 | 8.02 | 6.19 | 2.37 |
| 5 | 64.65 | 355 | 0.60 | 0.5 | 1 | 3.36 | 12.99 | 9.78 | 3.87 |
| | | | | | 2 | 3.91 | 14.21 | 11.61 | 4.28 |
| | | | | | 3 | 3.73 | 13.44 | 10.77 | 4.08 |
| | | | | | Moyenne | 3.66 | | | |
| 6 | 64.65 | 355 | 0.77 | 0.5 | 1 | 1.37 | 4.39 | 5.35 | 1.79 |
| | | | | | 2 | 2.04 | 9.98 | 7.04 | 2.65 |
| | | | | | 3 | 1.51 | 8.14 | 5.29 | 2.07 |
| | | | | | Moyenne | 1.64 | | | |

***Tableau III.6 :*** *Tableau des valeurs de rugosité (Ra) relevées lors de l'usinage avec lubrification.*




Graphe III .2 variation de la rugosité (Ra) en fonction de l'avance (f) lors de l'usinage avec lubrification.

- **Superposition des courbes F(f) :**




Graphe III .3 variation de la rugosité (Ra) en fonction de l'avance (f) lors de l'usinage à sec et lubrification.

## ***III .8. 3. Discussions :***

L’étude de la rugosité de surface de l’acier de nuance XC48 et l’influence de régime de coupe sur la qualité de surface.

La notre études paramètre choisie et l’avance entre milieu toute en conservant la vitesse de coupe Vc et profondeur de passe constante tous le long.

Les paramètres de rugosité obtenu Ra sans regroupe dans les tableaux (III. 5.6). Les graphes de la variation de rugosité en fonction de l’avance Ra = F(f) sont établis.

La lubrification, un paramètre aussi important que le régime de coupe, la qualification de l’ouvrier, et le chois de la machine joue un rôle très influent sur la rugosité de surface.

Des usinages sous lubrification donne un résultat meilleur que celui a sec.

L’usage du lubrifiant augmente la qualité de surface ainsi que la longévité de l’outil.

Suite au résultat obtenu, l’avance f = 0.091, 0.22 sont à éviter.

L'influence de l`avance sur la rugosité:

Selon le tableau de rugosité obtenus en variant l`avance, on peut déjà constates quel essai le résultat est parfait,

Sur ce en peut considérer notre résultat comme résultat idéal, les paliers (1), (6) donnant Ra=1.58, 1.64 allant jusqu`a 2.58, les rugosités peuvent être acceptes.

Sur ce, on peut dire que la rugosité de surface finies pour les avances énumérés ci-dessus est satisfaisante étant donne quel`usinage a été effectue a lubrification.

En ce concerne l`usinage sans lubrification la rugosité obtenus sont inferieur a celle obtenus sous lubrification pour ce cas-la on considère que palier (3) et (5).

Le régime de coupe pour les paliers (2) et (3) est à exclure suite aux résultats exécutifs de la rugosité obtenue.

## ***III.9.Conclusion :***

L'objectif principal de ce travail de recherche consiste à étudier l'effet de l'état de surface d'un acier XC48.

Au terme de cette étude on peut conclure que le rugosité dépend directement de régime de coupe et en particulier l'avance.

La lubrification améliore nettement l'état de surface mais ne l'assure jamais. Le choix de la géométrie de l'outil ainsi que celui d'une machine outil précise sont requis.

La lubrification on ne peut s'en passer, elle améliore nettement la qualité de surface et augmente la durée de vie de l`outil.

Le choix de la matière en œuvre et la qualification de l'ouvrier sont d'une grande importance.

On constate au chapitre III que le résultat obtenu avec lubrification est beaucoup mieux que celui sans lubrification.

## Références Bibliographique

[1] Génie mécanique (memontech) troisième édition Casteilla -25 rue -75005 paris de CLAUDE BARLIE ET BENOIT POULET

Les pages 85..93.98.100..103.126

[2] Alexandre Toumine, «Cours D'Usinage », Groupe Conception Production, INSA de Lyon, France

[3] Procédés d'usinage souhir gara ingénieur de l'ENI de Tunis

Les pages : 10.11.12.13..16.17.18.19.45.140.141..142

[4] Technique ingénieur –quelques graphe et photo

[5] Rocdacier, « Cours sur le Tournage - Usinage Cours Technologie », 2011.

[6] 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 2003.

[7 ] P.Yves Manach, S.Thuillier, H.Laurent, N.Le Maoût, R.Grèze; Mise en forme des matériaux métalliques par déformation plastique: influence du comportement matériel, Laboratoire d'ingénerie des Matériaux de Bretagne LIMATB Université de Bretagne Sud, 14éme Colloque National de la recherché en IUT Lyon 2008.

[8] Gaceb Mouhamed et Brahmi Sadek, Etude de l'influence de l'état de surface sur la tenue à la fatigue du XC48, (laboratoire de fiabilité des équipements pétroliers et matériaux) université M'hamed Bougarra de Boumerdes, Algérie

[9] Conception et dessin (memontech) 7eedition rue MICHAEL FARADAY, 78184 Saint-Quentin en Yvelines

Les pages : 130.131.132.133.134.135.136.

[10] Construction mécanique -1.dessin conception et normalisation – AFNOR NATHN

Les pages : 28.29

[11] Bourbiamounira, influence des procédés d'usinage sur les rugosités de surface et leurs répercussions sur un contact mécanique, thés magister 2009, Département de Mécanique, Faculté des sciences de l'ingénieur, UniverstéBadji Mokhtar.

[12] http://fr.wikipedia.org/wiki/Rectification_(m%C3%A9canique)

[13] http://fr.wikipedia.org/wiki/Superfinition

[14] Manuel de construction mécanique 3eme édition GUILLAUME SABATIER FRANÇOIS RAGUSA HUBERT ANTZ
Les pages 124.179

[15] J. D Puerta Velasquez, Étude des copeaux et de l'intégrité de surface en usinage à grande vitesse de l'alliage de titane TA6V. Thèse de doctorat, de l'Université de Metz.

[16] Alexandre Mondelin, Modélisation de l'intégrité des surfaces usinées Application au cas du tournage finition de l'acier inoxydable 15-5PH. Thèse de l'université de Lyon.

[17] W.S. Lin, B.Y. Lee, C.L. Wu, Modeling the surface roughness and cutting force for turning, J. Mater. Proc. Tech. 108 (2001) 286-293.

[18] P. Franco, M. Estrems, F. Faura, « Influence of radial and axial runouts on surface roughness in face milling with round insert cutting tools », International Journal of Machine Tools & Manufacture 2004 (44) : 1555 – 1565.].