

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté : sciences et technologies

Département : génie mécanique

Domaine : sciences et technologies

Filière : génie mécanique

Spécialité : fabrication mécanique et  
productique

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

L'INFLUENCE DES PARAMETRES DE COUPE SUR L'ETAT DE  
SURFACE Ra

Présenté par : Abdelli Mohamed Amine

Encadrant : BOURENANE RABAH

Grade : Professeur

Université UBM Annaba

### Jury de Soutenance :

CHELIA AZZEDINE	MCA	UBM Annaba	Président
BOURENANE RABAH	Pr	UBM Annaba	Encadrant
LAGRED AHMED	Pr	UBM Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

## **Remerciements**

*Mon remerciement s'adresse en premier lieu à ALLAH le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donnée durant cette longue année.*

*J'adresse aussi les grands remerciements à mon encadreur Pr. BOURENANE RABAH pour tout ce qu'il m'a appris, pour les conseils technique et m'avoir encadré dans mon travail et fait confiance Durant la réalisation de ce travail.*

*Je remercie pour sa disponibilité et son aide.*

*Mon respect et sincère remerciement à tous les membres de jury  
Mes remerciements s'adressent à tous les enseignants du département de génie mécanique.*

*Grands remerciements à tous les personnels de complexe sider el hadjar spécialement pour les AMM et l'ACO1.*

*Spécial remerciement pour tous les équipes de bureau des méthodes spécialement Mm. FATMA ZOHRA BELKHIRE, CHAROUFA l'opérateur de taillage des dents, ABD ELBASSET l'opérateur de tour 16k20CNC et Mr. CHAMSS EDDINE chef d'usinage.*

*En fin mes remerciements vont à ma famille et mes amis pour leurs soutiens moral et finance durant cette formation.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mon père et à ma mère sans oublier Mes frères.*

*Ainsi qu'à toute ma famille.*

*Mes amis et mes camarades de classe.*

*A tout ceux qui ont été à mes coté dans les moments difficiles.*

## Résumé

L'impact économique des coûts de fabrication et des exigences techniques sur l'état de surface du produit fini impose des meilleurs paramètres de coupe, donc c'est une tâche importante dans le processus d'usinage de choix des conditions de coupe les plus pratique. Dans ce contexte que s'inscrit ce travail de mémoire de fin d'étude. Il consiste à investiguer le comportement des outils en carbure métallique (GC1025) à l'acier mi-dur (XC48) dans un plusieurs paramètre de coupe.

Le présent travail étudie de l'influence des paramètres de coupe soit, la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur l'état de surface ou bien sur la rugosité Ra.

## Abstract

The economic impact of manufacturing costs and technical requirements on the surface condition of the finished product imposes the best cutting parameters, so it is an important task in the machining process to choose the most practical cutting conditions. It is in this context that this end-of-study dissertation takes place. It consists in investigating the behavior of metal carbide tools (GC1025) to medium-hard steel (XC48) in several cutting parameters.

This work studies the influence of the cutting parameters, the cutting speed, the feed per revolution and the depth of cut, on the surface condition.

## ملخص

يفرض التأثير الاقتصادي لتكاليف التصنيع و المتطلبات الفنية على حالة سطح المنتج النهائي افضل معايير القطع لذلك من المهم في عملية التصنيع اختيار انسب الظروف لتحقيق المطلوب و في هذا السياق يتم اجراء اطروحة نهاية الدراسة هذه الذي يتمثل في فحص تأثير كربيد المعدن على فولاذ متوسط الصلابة في مختلف شروط القطع.

يدرس هذا العمل تأثير معاملات القطع، سرعة القطع، وعمق القطع على حالة السطح أو على الخشونة.

# Sommaire

Remerciements	
Dédicace	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	

INTRODUCTION GENERALE .....	1
-----------------------------	---

## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction .....	2
I.2. L'usinabilité .....	2
I.3. Paramètres de coupe de tournage .....	2
I.3.1. Vitesse de coupe ( $V_c$ ) .....	2
I.3.2. Avance par tour ( $f$ ) .....	3
I.3.3. Profondeur de passe ( $a_p$ ) .....	4
I.4. Outils de coupes .....	5
I.4.1. Acier rapide (AR) .....	5
I.4.2. Carbure de tungstène cémenté .....	5
I.4.3. Les cermets .....	5
I.4.4. Céramiques .....	6
I.4.5. Nitrure de bore cubique (CBN) .....	6
I.4.6. Diamant polycristallin (pcd) .....	6
I.4.7. Revêtements .....	6
I.4.8. Géométrie des outils de coupe .....	7
I.4.9. Les angles de coupe .....	7
I.4.10. Mouvement relatif outil / pièce .....	8
I.4.11. Choix du matériau de l'outil de coupe .....	9
I.5. Usure des outils de coupe .....	10
I.6. Machine-outil .....	11
I.6.1. Les types des machine –outil .....	11
I.6.2. Le type de commande .....	12

I.7. Le tournage.....	14
I.7.1. Machine-outil .....	16
I.7.1.1. Classification des machines de tour.....	16
I.7.2. Les définitions des principales opérations de tournage .....	18

## **CHAPITRE II : RUGOSITE DE SURFACE**

II.1. Définition .....	25
II.1.1. Généralités sur les états de surface.....	25
II.2. Rugosité.....	25
II.3. Les défauts d'états de surface .....	25
II.3.1. Ordre 1 : défauts de forme .....	26
II.3.2. Ordre 2 : défauts macrographiques, ondulation .....	27
II.3.3. Ordre 3 : défauts micrographiques, rugosité.....	28
II.3.4. Ordre 4 : arrachement de matière .....	29
II.4. Différents types de lignes.....	29
II.4.1. Ligne moyenne.....	29
II.4.1.1. Longueur de base et d'évaluation .....	30
II.4.2. Ligne de référence.....	30
II.4.3. La ligne enveloppe supérieure .....	30
II.4.4. La ligne enveloppe inférieure .....	30
II.5. Paramètres de rugosité unidimensionnelle.....	31
II.6. Paramètres d'amplitude de rugosité .....	31
II.7. Principaux paramètres de la rugosité .....	35
II.7.1. Paramètres liés aux motifs et à la ligne enveloppe .....	35
II.7.2. Paramètres liés à la ligne moyenne .....	36
II.7.3. Paramètres liés à la distribution d'amplitude.....	37
II.7.4. Distribution d'amplitude.....	37
II.8. Les spécifications normalisées .....	38
II.9. Généralité sur les techniques d'amélioration des états de surface .....	39
II.9.1. La rectification.....	39
II.9.1.1. Principe de la rectification.....	39
II.9.1.2. Matériaux.....	40
II.9.1.3. Avantage de la rectification.....	40

II.9.2. Superfinition .....	40
II.9.3. Galetage.....	41
II.9.4. Rodage .....	42
II.10. Avantages de la lubrification .....	42
II.10.1. Maintien en température .....	42
II.10.2. Lubrification .....	43
II.11. Evacuation des copeaux .....	43
II.12. Composition des fluides d'usinage.....	43
II.12.1. Huiles entières.....	43
II.12.2. Fluides de type émulsion .....	43
II.12.3. Fluides de type microémulsion.....	44
II.12.4. Fluides synthétiques.....	44

### **CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE**

III.1. Introduction.....	45
III.2. Equipements et preparation des expériences .....	45
III.3. Expériences et machines-outils utilisés .....	45
III.4. Matériau utilisé .....	45
III.4.1. Analyse chimique moyenne .....	45
III.4.2. Propriétés physiques et mécaniques .....	45
III.4.3. Caractéristiques .....	46
III.5. Machine-outil utilisés .....	46
III.5.1. Caractéristiques techniques et dimensions.....	46
III.5.2. Outil de coupe utilisé.....	48
III .5.3. Régime de coupe .....	49
III.6. Routage d'usinage .....	49
III.7. Programme de la machine .....	50
III.8. Présentation de l'éprouvette .....	50
III.9.1. Caractéristiques techniques .....	52
III.10. Conditions de coupe .....	54
III.11. Planification des expériences.....	54
III.11.1. Résultats expérimentaux.....	54
III.11.2. Condition d'usinage à l'aide de .....	55

III.11.3. Résultats des essais ( à l'aide de minitab) .....	55
III.11.4. Représentation graphique.....	61
III.11.5. Analyse de régression pour ra .....	58
III.12. Discussions .....	59
III.13. Conclusion.....	60

# Liste des figures

## Chapitre I : Etude Bibliographique

<b>Figure I.1.</b> : Vitesse de coupe [8] .....	03
<b>Figure I.2.</b> : Avance par tour [8].....	04
<b>Figure I.3.</b> : Profondeur de passe ap [7] .....	04
<b>Figure I.4.</b> : Arêtes et parties actives d'un outil de tournage [10].....	07
<b>Figure I.5.</b> : Principaux plans de l'outil en main [11] .....	08
<b>Figure I.6.</b> : Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage [12] .....	08
<b>Figure I.7.</b> : Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant [12].....	09
<b>Figure I.8.</b> : Formes d'usure sur les outils de coupe [12].....	11
<b>Figure I.9.</b> : Tour conventionnelle [10] .....	12
<b>Figure I.10</b> : Fraiseuse et tour en CN [10].....	12
<b>Figure I.11.</b> : Manivelle [10].....	13
<b>Figure I.12.</b> : Boite vitesse [10].....	13
<b>Figure I.13.</b> : Présentation des axes de mouvement [10] .....	14
<b>Figure I.14.</b> : les différents outils de tournage [10].....	14
<b>Figure I.15.</b> : Chemin d'un tour parallèle [10] .....	16
<b>Figure I.16.</b> : Le chariotage cylindrique et conique [15].....	18
<b>Figure I.17.</b> : Dressage extérieur et intérieur [15] .....	18
<b>Figure I.18.</b> : Le perçage [15].....	18
<b>Figure I.19.</b> : L'alésage cylindrique et conique [15].....	19
<b>Figure I.20.</b> : Le rainurage intérieur et extérieur [15] .....	19
<b>Figure I.21.</b> : Le tronçonnage [15].....	19
<b>Figure I.22.</b> : Le filetage intérieur et extérieur [15] .....	20
<b>Figure I.23.</b> : Les outils à charioter. Epaulement conique et épaulement droit [15].....	20
<b>Figure I.24.</b> : Le dressage extérieur cylindrique et conique [15] .....	21
<b>Figure I.25.</b> : Le dressage intérieur [15].....	21
<b>Figure I.26.</b> : Alésage cylindrique et alésage conique [15].....	21
<b>Figure I.27.</b> : Différents outils à charioter et dresser [15].....	22
<b>Figure I.28.</b> : Divers outils à aléser et dresser [15] .....	22

<b>Figure I.29.</b> : Les outils à rainurer [15] .....	23
<b>Figure I.30.</b> : Outil à tronçonner [15] .....	23
<b>Figure I.31.</b> : Outils à fileter [15] .....	23

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

<b>Figure II.1</b> : Profil de surface [17] .....	25
<b>Figure II.2:</b> Les types de défauts de surface [17] .....	26
<b>Figure II.3</b> : Défauts d'ordre 1[17].....	26
<b>Figure II.4</b> : Motif d'ondulation.....	27
<b>Figure II.5</b> : Profil « redressé » .....	28
<b>Figure II.6</b> : Profondeur d'aplanissement et écart moyen de rugosité : Rp et Ra [17] .....	28
<b>Figure II.7</b> : arrachement de matière [17] .....	29
<b>Figure II.8</b> : la ligne moyenne [17] .....	29
<b>Figure II.9</b> : la présentation de la longueur de base [17].....	30
<b>Figure II.10</b> : Ligne des moindres carrés [20].....	30
<b>Figure II.11</b> : Ligne enveloppe inférieure et supérieure [20].....	31
<b>Figure II.12</b> : Hauteur maximale du profil Rt [22] .....	32
<b>Figure II.13</b> : Hauteur maximale moyenne Rz [22] .....	34
<b>Figure II.14</b> : profil total caractérisé par:(Wi,Wmax,AW)i et Rmax et largeur d'entaille [3].....	35
<b>Figure II.15</b> : Paramètre liés a la longueur de bas [4] .....	36
<b>Figure II.16</b> : Paramètres liés à la longueur d'évaluation [3].....	37
<b>Figure II.17</b> : Paramètres liés à la distribution d'amplitude [4] .....	37
<b>Figure II.18</b> : symbole graphique de l'état de surface [22].....	38
<b>Figure II.19</b> : Exemple de symbolisation [22] .....	38
<b>Figure II.20</b> : opération de la Rectification [6] .....	39
<b>Figure II.21</b> : opération de superfinishion [13] .....	41
<b>Figure II.22</b> : opération de galetage [13].....	41
<b>Figure II.23</b> : Liquide de coupe [11] .....	42

## **Chapitre III Partie Expérimentale**

<b>Figure III.1</b> : Tour à commande numérique modèle 16K20 fabriqué en RUSSIE.....	48
<b>Figure III.2</b> : outil à charioter et dresser/outil à tronçonner.....	51
<b>Figure III.3</b> : Dessin de définition de la pièce.....	51
<b>Figure III.4</b> : Dispositif pour mesurer la rugosité.....	53
<b>Figure III.5</b> : Capteur de rugosimètre.....	53
<b>Figure III.6</b> : représentation graphique des paramètres de coupe en fonction de Ra.....	57

## Liste des tableaux

<b>Tableau III.1. :</b> Composition chimique.....	45
<b>Tableau III.2. :</b> Caractéristiques mécaniques moyennes (état normalisé) .....	46
<b>Tableau III.3. :</b> Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées.....	49
<b>Tableau III.4. :</b> Paramètres de coupe et leurs niveaux pour un plan de 9 essais.....	49
<b>Tableau III.5. :</b> Récapitulatif du plan.....	55
<b>Tableau III.6. :</b> Condition d'usinage .....	55
<b>Tableau III.7. :</b> Résultats d'essai.....	56/57
<b>Tableau III.8. :</b> Coefficients de constante.....	58

## 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 arithmetique	µm
Rt	Rugosite totale	µm
Rz	Rugosite	µm
Rq	Rugosite quadratique	µm
A	Allongement	%
Re	Limite elastique	MPa
Rm	Limite de rupture	MPa
Alpha( $\alpha$ )	Angle de depouille	Rd
Beta( $\beta$ )	Angle de taillant	Rd
$\Phi$	Angle de cisaillement primaire	Rd
$\Gamma$	Angle de coupe	Rd

# ***CHAPITRE I***

## ***Etude bibliographique***

## Introduction générale

L'usinage par enlèvement de matière permet d'élaborer des pièces mécaniques finies, historiquement, la recherche sur l'usinage c'est concentrée sur deux aspects : le premier aspect concerne le développement technologique qui permet d'améliorer la productivité et 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. [1]

Cependant, le processus de fabrication, l'usinage joue un rôle important sur la qualité 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. [2]

La connaissance de l'impact que peut avoir l'usinage de la surface d'un produit fini à forte valeur ajoutée pour les ingénieurs et les scientifiques. Les défis principaux sont la prédiction du copeau formé, du comportement mécanique, et l'évolution de la microstructure du comportement en corrosion des matériaux usinés. De nombreuses études adoptant des approches numériques et expérimentales dans l'objectif d'analyser la formation du copeau. Par contre, beaucoup moins d'attention a été portée sur les conditions d'usinage appliquées et les propriétés physico-chimiques des surfaces usinées qui en dépendant (contraintes résiduelles induites, transformation de phase, recristallisation, dureté, rugosité de la surface...) [3]

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 maîtriser 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. [4]

## I.1. Introduction

Ce chapitre est dédié à l'étude bibliographique des différents paramètres de coupe en tournage, les paramètres technologiques de l'usinage, ainsi que les outils de coupe et leur géométrie.

## I.2. L'usinabilité

L'usinabilité peut être définie comme l'aptitude d'un matériau à subir une mise en forme par enlèvement de matière. [5]

L'usinabilité peut être évaluée à partir d'une combinaison des paramètres suivants:

- L'évolution des efforts de coupe et de la puissance consommée.
- Le débit de copeaux
- La durée de vie des outils
- La productivité

La notion d'usinabilité dépend donc d'un critère choisi par l'usineur mais reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût et/ou à la meilleure qualité pièce. [6]

## I.3. Paramètres de coupe de tournage

Les paramètres de coupe sont, d'une part, des valeurs qui caractérisent les déplacements de l'outil et de la pièce usinée (paramètres de coupe cinématiques) et d'autre part, les valeurs des surépaisseurs d'usinage et des dimensions de coupe (paramètres de coupe géométriques). Les conditions de coupe sont une notion plus large qui inclut les paramètres géométriques et cinématiques de coupe en plus d'autres facteurs qui influencent l'usinage tels que le matériau usiné, le matériau et la géométrie de l'outil, les fluides de coupe, l'état de la machine-outil, etc. [7]

### I.3.1. Vitesse de coupe ( $V_c$ )

Pour le tournage, la vitesse de coupe est le chemin parcouru en mètres par minute, par un point placé sur le diamètre extérieur de la pièce **figure I.1**. Ce que l'on appelle en usinage "vitesse de coupe" correspond en cinématique à la vitesse circonférentielle uniforme, elle est régie par la formule suivante : [8]

$$n=V_c/\pi.d$$

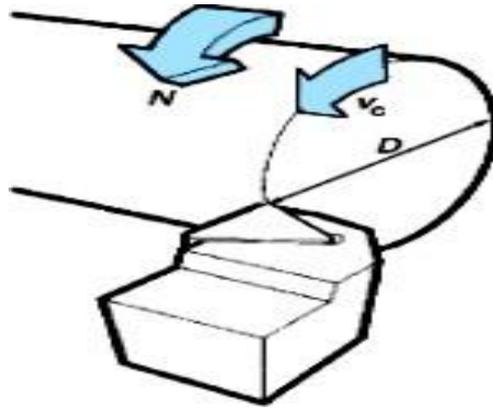


Figure I.1. : Vitesse de coupe [8]

La vitesse est donc une distance dans une unité de temps. Le choix des vitesses de coupe dépend des facteurs suivants : [8]

- De la matière à usiner généralement, plus la matière est tendre, plus la vitesse élevée.
- De la nature de la matière de l'outil de coupe
- Du genre d'usinage Ébauche, finition, tournage, filetage ... et...
- De la profondeur de passe Plus la quantité de matière est importante moins la vitesse de coupe est grande.
- De la forme de la pièce et de sa fixation, du serrage de l'outil de coupe La rigidité du montage de l'outil de coupe ainsi que le bon serrage de la pièce (tenir compte de la forme pour des raisons de déformations) ont une influence sur les vitesses de coupe.
- Du lubrifiant Une abondante lubrification permet d'augmenter la vitesse de coupe
- Du type de machine Une machine robuste peut supporter des vitesses de coupe plus élevée par rapport à une machine de construction plus légère.

### I.3.2. Avance par tour (f)

En tournage, l'avance est le déplacement en millimètre de l'outil pendant un tour de la pièce. C'est aussi l'épaisseur du copeau **figure I.2** Comme pour le choix de la vitesse de coupe, le choix

Des avances dépendent de la matière à usiner, mais aussi de la profondeur de passe, nature du métal de l'outil de coupe, l'état de surface à obtenir...etc... [8]

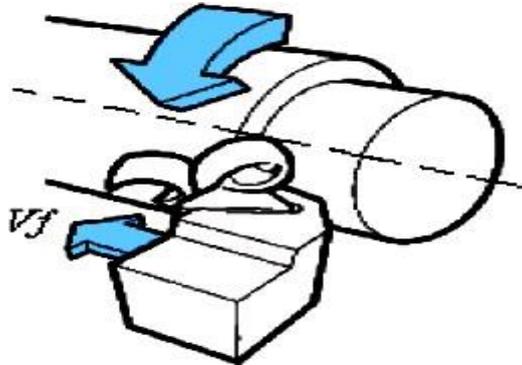


Figure I.2. : Avance par tour [8]

### I.3.3. Profondeur de passe ( $a_p$ )

En chariotage, la profondeur de passe ( $a_p$ ) **figure I.3** est la différence de rayon entre la surface non usinée et la surface usinée (c'est-à-dire la moitié de la différence entre le diamètre non usiné et le diamètre usiné). La profondeur de coupe est toujours mesurée Perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arrête de l'outil [7]

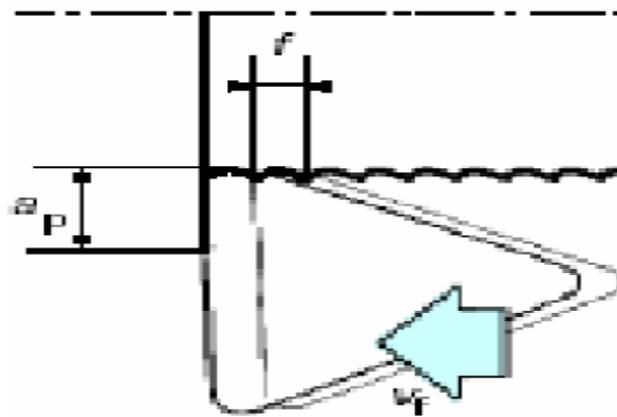


Figure I.3.: Profondeur de passe  $a_p$  [7]

## I.4. Outils de coupes

Un outil de coupe doit être tenace pour résister aux chocs rencontrés lors de l'usinage, il ne doit pas se déformer plastiquement et sa déformation élastique doit être minimale afin de garantir une bonne précision de coupe, il doit être dur pour résister à l'usure et doit supporter les hautes températures atteintes durant les opérations de coupe.

Le choix d'un matériau pour un outil est le résultat d'un certain nombre de compromis.

La modification des conditions de coupe, du procédé d'usinage ou du matériau de la pièce suffit à bouleverser ce compromis. C'est pourquoi il existe une grande variété de matériau de coupe. Les différents matériaux pour outils de coupe peuvent être regroupés selon différentes catégories :

### I.4.1. Acier rapide (AR)

Est utilisé depuis le début du siècle et il constitue encore aujourd'hui un matériau très utilisé. Il possède la ténacité la plus élevée et donc un choix privilégié pour les opérations instables et à coupe interrompue. De plus, il permet des arêtes très tranchantes, qui permettent la réalisation d'usinage sans bavures, donc il est particulièrement intéressant pour l'usinage des polymères. [9]

### I.4.2. Carbure de tungstène cémenté

Est devenu le matériau le plus utilisé. Ce substrat cémenté est obtenu par frittage de poudres métalliques constituées d'une « matière » dure (à base de carbure de tungstène WC) et d'un liant fusible lors du frittage (cobalt). Il présente un bon compromis dureté-ténacité et peut être utilisée à des températures supérieures à celles de l'acier rapide. En plus du carbure de tungstène (WC) et du Co, le carbure peut contenir dans des proportions variables des carbures additifs : souvent du carbure de titane (TiC), du carbure de tantale (TaC), du carbure de Niobium (NbC) pour les plus utilisés. Ces carbures additionnels permettent de diminuer l'usure en cratère qui survient lors de l'usinage de l'acier. [9]

### I.4.3. Les cermets

Le mot cermet provient de la contraction des mots céramique et métal CERAmique / METal, dans l'application qui nous intéresse ici, cermets, est le nom générique utilisé pour les carbures à base de titane, parmi lesquelles figurent le carbure de titane TiC, le carbonitride de titane TiCN et le nitrure de titane TiN. Comparé aux carbures cémentés, les cermets possèdent une meilleur thermiques mais au détriment de la ténacité. [9]

### I.4.4. Céramiques

Sont chimiquement très stables et peuvent être utilisés à des vitesses de coupe très élevées. Ils offrent une dureté à chaud très élevée. Ils sont principalement composés d'oxyde d'aluminium  $Al_2O_3$  ou de nitrure de silicium ( $Si_3N_4$ ). Leur application est principalement orientée vers la fonte grise, l'acier trempé et certains alliages exotiques. Leur ténacité est faible. Ils sont extrêmement sensibles aux conditions d'attaque de la matière. Ils sont principalement utilisés en tournage. [9]

### I.4.5. Nitrure de bore cubique (CBN)

Possède une dureté extrêmement élevée, devancée seulement par le diamant. A chaud, cette dureté demeure excellente et il peut être utilisé jusqu'à  $2000^{\circ}C$ . Moins fragile que la céramique, il possède une excellente résistance à l'usure par abrasion. Son coût élevé le limite principalement à la production en série. Les cristaux de CBN, similaires à ceux du diamant synthétique, sont maintenus par un liant céramique ou métallique. Un liant céramique offre une ténacité faible mais une meilleure stabilité chimique et une excellente résistance à l'usure. Le liant métallique offre les caractéristiques inverses (bonne ténacité et moins résistant à l'usure). On recommande le CBN pour l'usinage de pièces dont la dureté est supérieure à 48HRC. [9]

### I.4.6. Diamant polycristallin (PCD)

Est un diamant synthétique qui possède une dureté proche de celle du diamant naturel (dureté 10 dans l'échelle de Mohs). Ce matériau est très onéreux et ses applications sont limitées à l'usinage des matériaux non-ferreux. La haute résistance à l'usure par abrasion les rend économiquement viables pour l'usinage des matériaux hautement abrasifs tels que les composites et le graphite. [9]

### I.4.7. 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 :

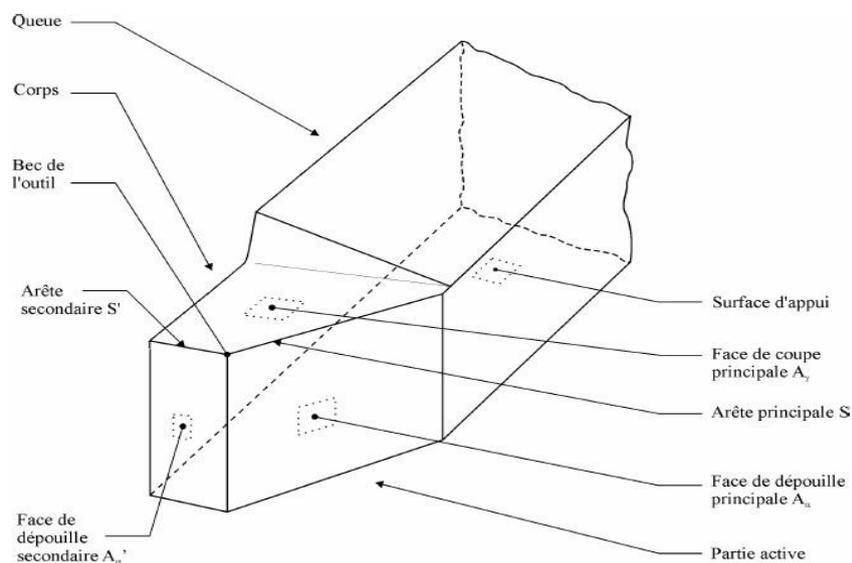
- Le nitrure de titane ( $TiN$ ), matériau standard.
- Le carbonitrure de titane ( $TiCN$ ), grande dureté, bonne résistance à l'abrasion.
- L'oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ ) et nitrure de silicium ( $Si_3N_4$ ), appartiennent à la classe des céramiques ; ce sont deux matériaux de base auxquels on peut 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. [10]

### I.4.8. Géométrie des outils de coupe

Un outil de coupe est constitué d'une queue (partie par laquelle est maintenu le porte-outil de machine) et d'une partie active appelée encore corps en matériau de l'outil. L'élément essentiel de partie active est de coupe principale qui est l'intersection de face de coupe et de la face de dépouille principale [10]



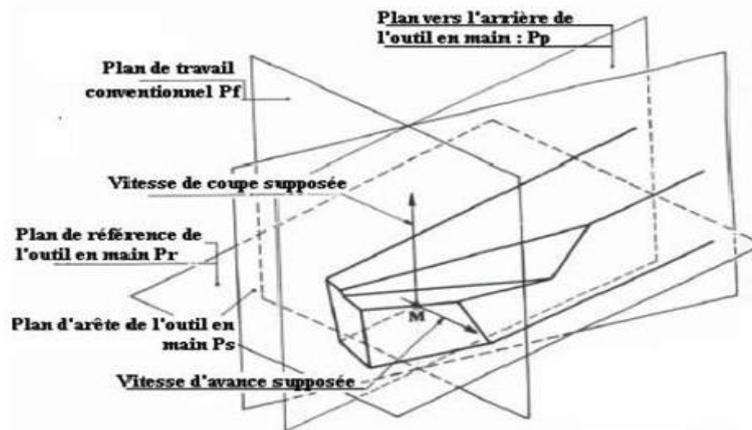
**Figure I.4. :** Arêtes et parties actives d'un outil de tournage [10]

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. [10]

### I.4.9. Les 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  $K_r$  (angle mesuré entre le plan Pf et ps).
- Angle d'inclinaison de l'arête de coupe  $\lambda_s$  (angle mesuré entre le plan Pr et l'arête de coupe).
- Angle de pointe de l'outil  $\epsilon_r$  (angle mesuré entre le plan principal Ps et le plan secondaire).
- Angle de direction d'arête secondaire  $K_r'$  (angle mesuré entre le plan Pf et le plan Pr). [10]



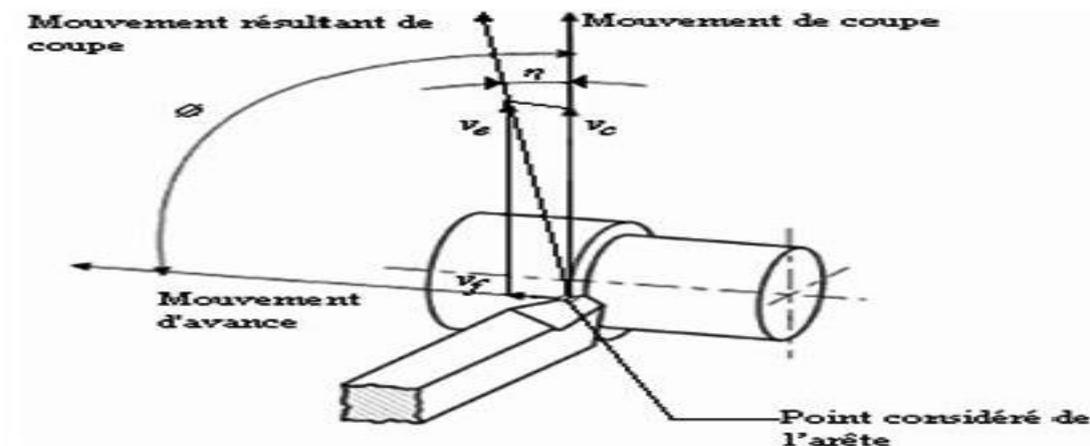
**Figure I.5. :** Principaux plans de l'outil en main [11]

Les angles de direction d'arête principale  $K_r$ , de pointe de l'outil  $\epsilon_r$ , et de direction d'arête secondaire  $K_r'$  sont liés par l'équation (éq I.1).

$$K_r + \epsilon_r + K_r' = 180^\circ \quad (\text{I.1})$$

### I.4.10. 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.6. :** Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage [12]

- **Mouvement de coupe  $M_c$**

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. [11]

- **Mouvement d'avance  $M_a$**

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. [11]

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 ( $\emptyset$ ). [11]

- **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. [11]

### I.4.11. Choix du matériau de l'outil de coupe

Le diagramme qui nous permet de déterminer les différents matériaux d'outils utilisés dans les différents domaines. 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 [10]

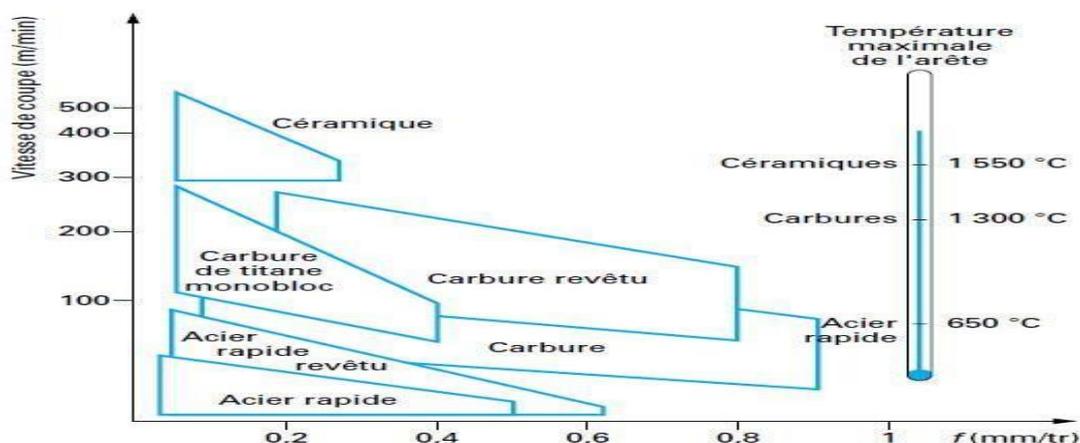


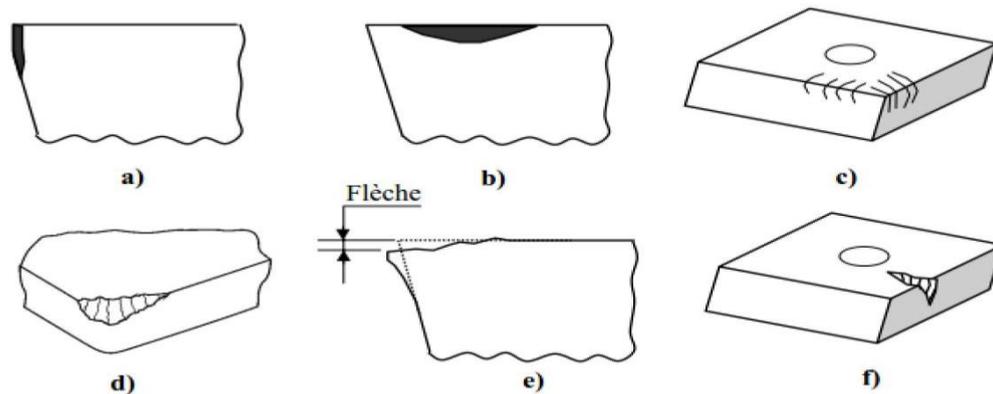
Figure I.7. : Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant [12]

### I.5. Usure des outils de coupe

L'usure est définie par la matière qui sort définitivement du contact outil – pièce. L'usure de l'outil est la conséquence directe des sollicitations très sévères que subissent les faces de coupe et de dépouille. Ces sollicitations sont de nature mécanique, accentuées par les effets thermiques. [9]

En fonction des conditions d'usinage (la nature de l'outil, du matériau usiné, du type d'usinage et des conditions de coupe) nous pouvons avoir les types d'usures suivantes : [12]

- Usure en dépouille : Ou usure frontale due aux frottements de la surface de coupe de la pièce sur la surface en dépouille de l'outil. Elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête tranchante de l'outil **figure I.8 (a)**.
- Usure suivant la surface d'attaque : elle se caractérise par une cuvette dite "cratère " formée sur la surface d'attaque de l'outil suite au frottement du copeau sur celle-ci **figure I.8 (b)**. Cette forme d'usure est due à l'existence des températures élevées au contact du copeau et de l'outil provoquant une diffusion importante. Cette usure peut jouer un rôle important quand à l'enroulement et la fragmentation du copeau.
- Fissuration de l'arête : On observe l'apparition de fissures sur l'arête coupante dans le cas des usinages avec des chocs mécaniques ou thermiques, ou avec des vibrations périodiques des efforts provoqués par une coupe discontinue. Elle est propre aux outils en carbure métalliques **figure I.8 (c)**.
- Rupture (cassure) de la pointe : c'est la destruction totale du bec de l'outil (Observée dans le cas des outils en acier rapide), **figure I.8 (d)**.
- Déformation plastique : la pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des hautes pressions dans la zone de coupe. Cette déformation de la pointe de l'outil influe sur sa géométrie et par conséquent sur la précision et l'état de surface usinée, **figure I.8 (e)**.
- Entaille : Dans certaines conditions de coupe, il se produit des arrachements, l'arête tranchante à la hauteur du diamètre périphérique s'use et il y a un effondrement à cet endroit. L'entaille est due à des passages successifs de l'outil sur une couche écrouie par le passage précédent, donc plus dure, **figure I.8 (f)**. [12]



**Figure I.8. :** Formes d'usure sur les outils de coupe [12]

### I.6. 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.6.1. Les types des 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

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. :** Tour conventionnelle [10]

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



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

### I.6.2. Le 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 [10]

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 boîte de vitesse mécanique.



**Figure I.12. :** Boite vitesse [10]

- **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.7. Le tournage

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, lorsquela 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. [10]



Figure I.13. : Présentation des axes de mouvement [10]

On distingue deux classes distinctes d'opérations de tournage :

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

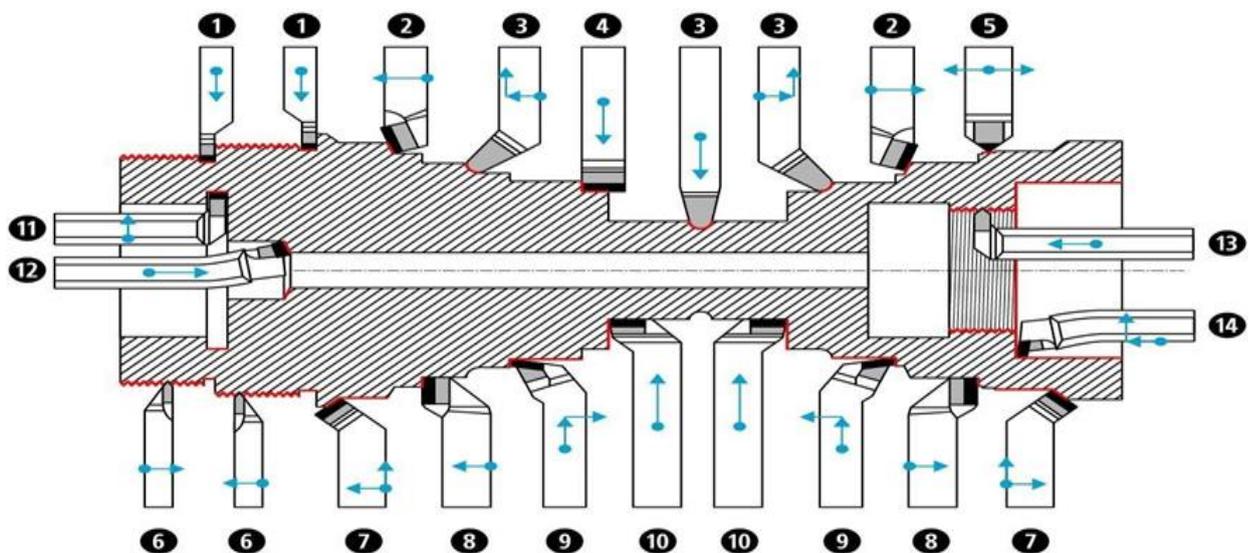


Figure I.14.les différents outils de tournage [10]

## Chapitre I: étude bibliographique

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. [10]

## I.7.1. Machine-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. [10]

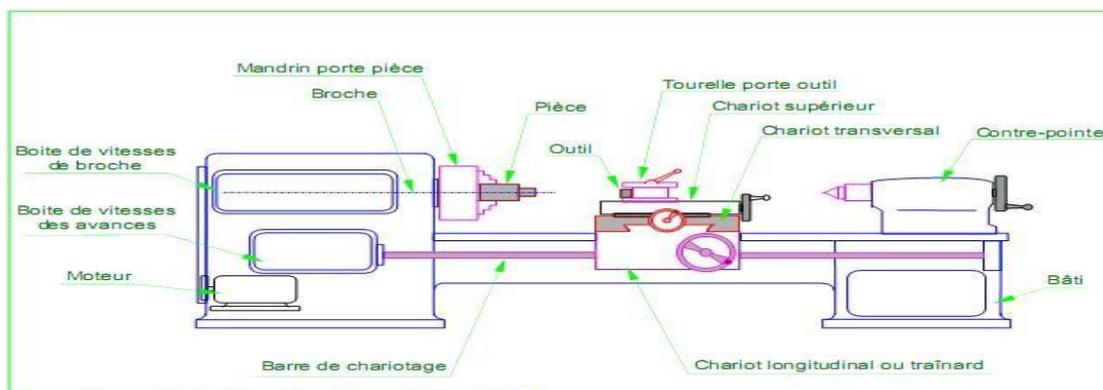


Figure I.15. : Chemin d'un tour parallèle [10]

### I.7.1.1. 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. [10]

- **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. [10]

- **Les tours semi-automatiques**

Ce sont des tours équipés d'un trainard 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. [10]

- **Les tours automatiques**

Plusieurs outils sont montés tangentiellement à la pièce. Les mouvements sont obtenus par descames 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. [10]

- **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. [10]

- **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. [10]

## I.7.2. Les définitions des principales opérations de tournage

- **Le chariotage :**

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

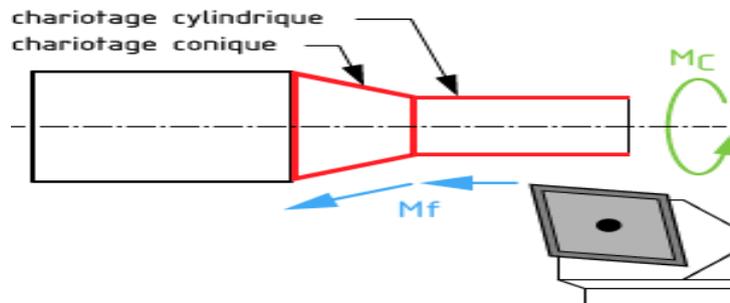


Figure I.16. : Le chariotage cylindrique et conique [15]

- **Le dressage :**

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

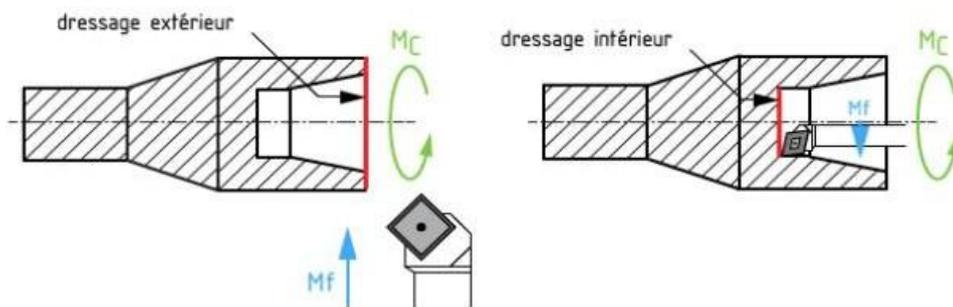


Figure I.17. : Dressage extérieur et intérieur [15]

- **Le perçage :**

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.

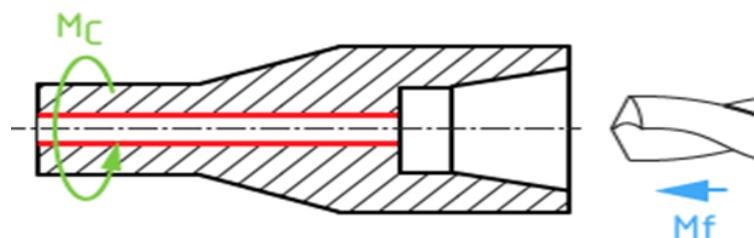


Figure I.18. : Le perçage [15]

- **L'alésage :**

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

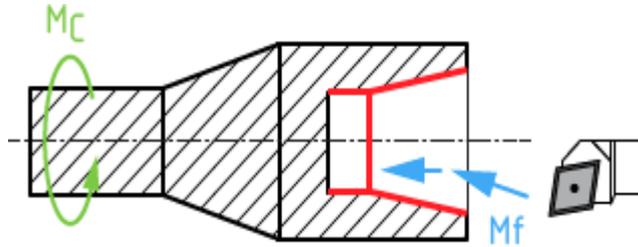


Figure I.19. : L'alésage cylindrique et conique [15]

- **Le rainurage :**

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.

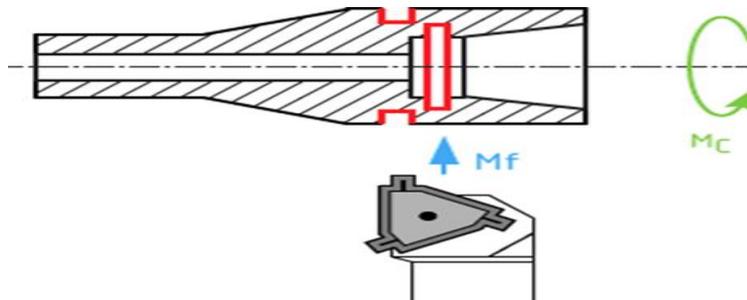


Figure I .20. : Le rainurage intérieur et extérieur [15]

- **Le tronçonnage :**

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

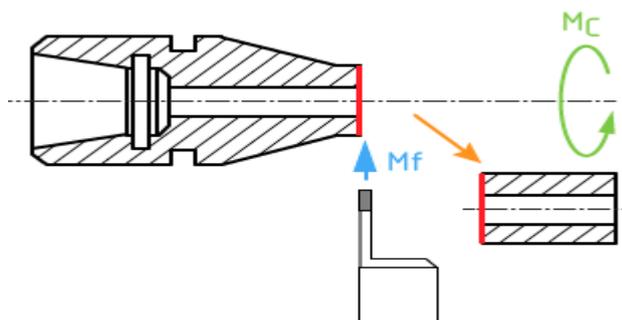
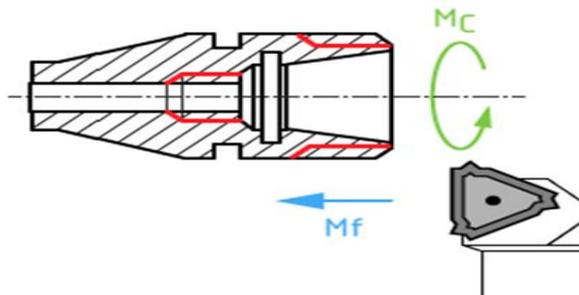


Figure I .21. : Le tronçonnage [15]

- **Le filetage :**

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



**Figure I.22. :** Le filetage intérieur et extérieur [15]

- **L'épaulement**

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

- **Le profilage**

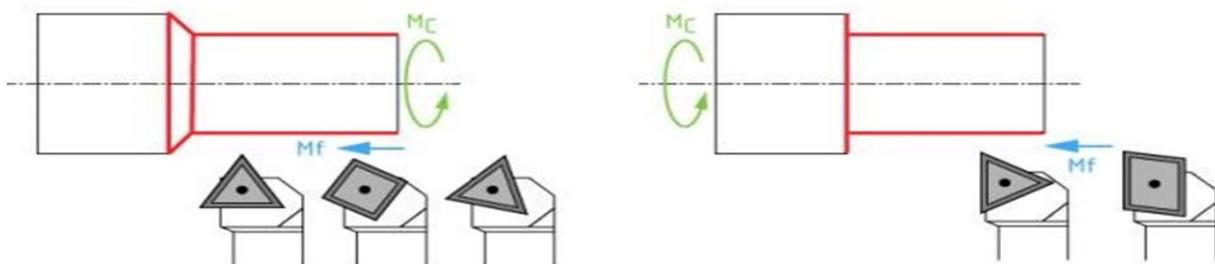
Le **profilage** est la réalisation de surfaces quelconques par l'association de surfaces cylindriques, planes, coniques, sphériques, etc...

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.

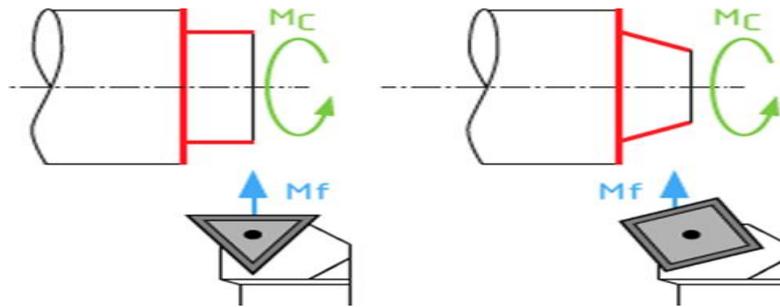
**Sur la figure ci-dessous sont illustrés quelques exemples d'outils à charioter.**



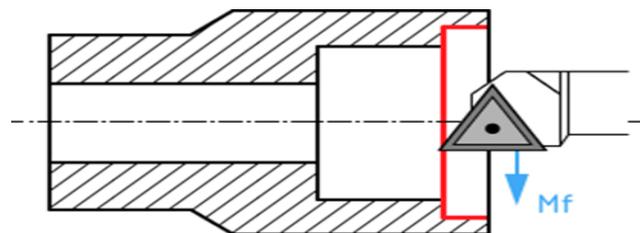
**Figure I.23. :** Les outils à charioter. Epaulement conique et épaulement droit [15]

- **Les outils à dresser :**

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.



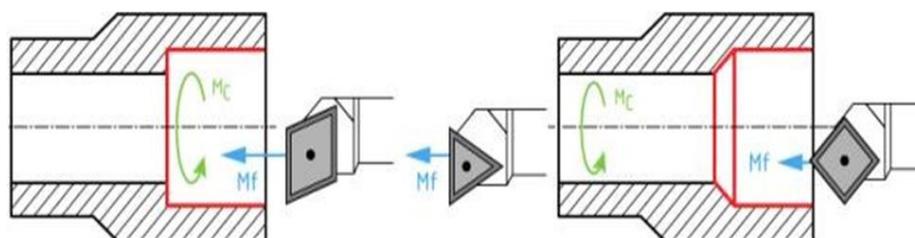
**Figure I.24. :** Le dressage extérieur cylindrique et conique [15]



**Figure I.25. :** Le dressage intérieur [15]

- **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.26. :** Alésage cylindrique et alésage conique [15]

- **Les outils à rainurer**

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

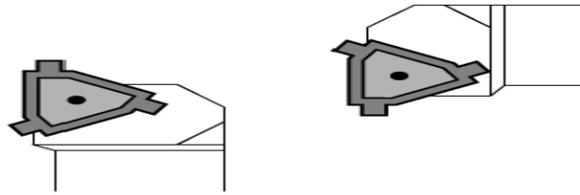


Figure I.27. : Les outils à rainurer [15]

- **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.

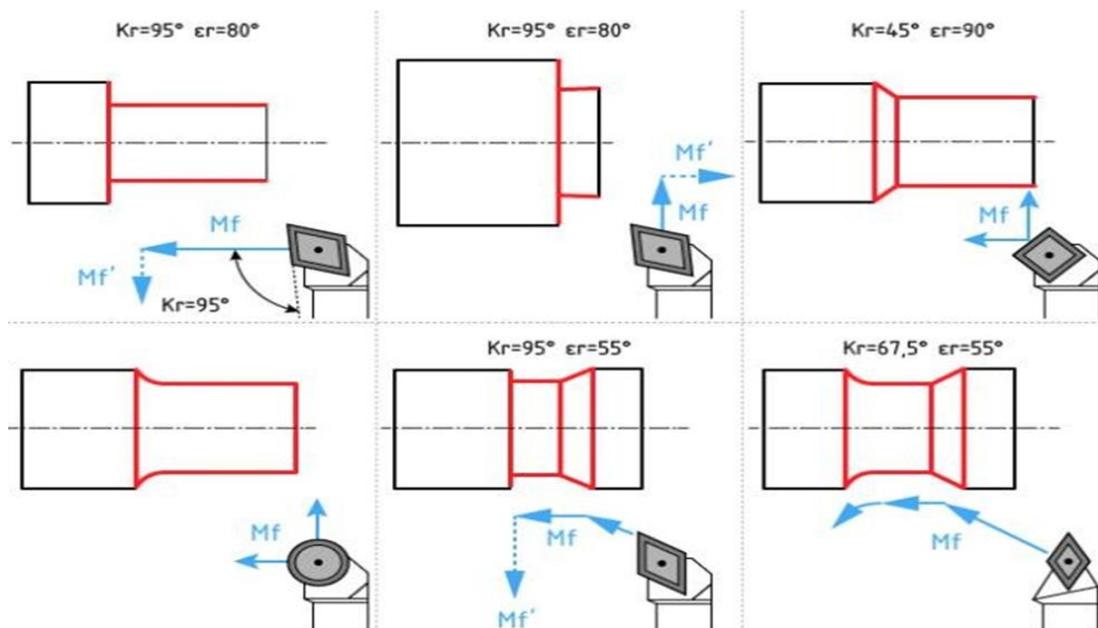


Figure I.28. : Différents outils à charioter et dresser [15]

- **Les outils à aléser-dresser :**

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

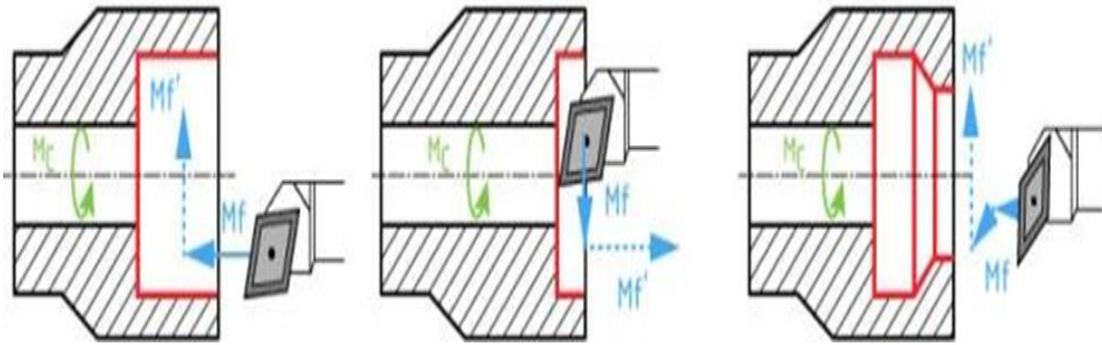


Figure I.29. : Divers outils à aléser et dresser [15]

- **Les outils à tronçonner**

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

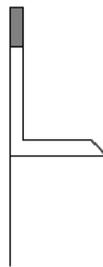


Figure I.30. : Outil à tronçonner [15]

- **Les outils à fileter**

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

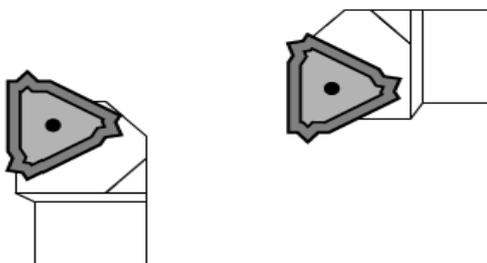


Figure I.31. : Outils à fileter [15]

# *Chapitre II*

## *La rugosité de surface*

### Introduction

Les pièces mécaniques produites par les différents procédés présentent des nuances distinctes dans l'état de leurs surfaces. Ces différences rendent les surfaces obtenues par les différents procédés faciles à être identifiées.

Grâce à son caractère unique, l'état de surface obtenu par un procédé quelconque peut être d'ores et déjà comparé à d'autres surfaces obtenues par le même procédé à travers des moyens simples tels que la mesure de la taille moyenne de travers.

Des moyens simples tels que la mesure de la taille moyenne de ses irrégularités, En utilisant les normes en vigueur et les techniques modernes de mesure. [24]

### II.1. Définition

La rugosité est le résultat de la modification micro géométrique d'une surface, due au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage...etc.). Apparaissentse forme : des aspérités appelées "Pics" ou des cavités appelées "Creux".

#### II.1.1. 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 conditionsde coupe, et la Matière en œuvre. [16]

### 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 macrographiques.

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. [16]

### 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 le profil de cette surface.

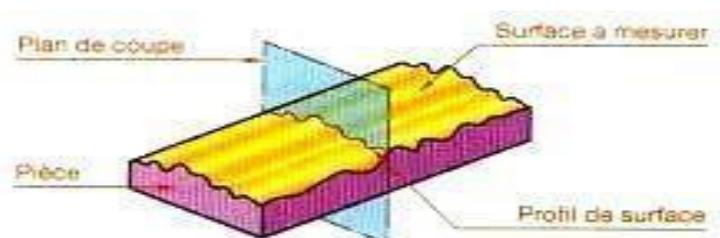
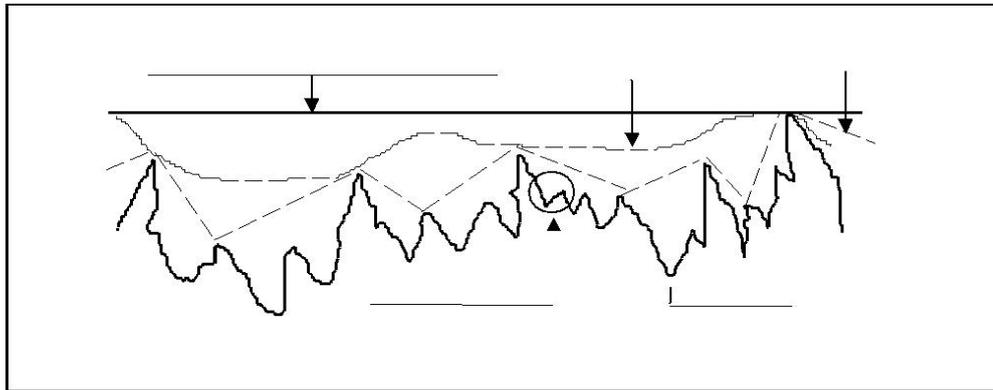


Figure II. 1 : Profil de surface [17]

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).
2. Défaut de planéité, de rectitude, de circularité.
3. Ondulation (échelle macroscopique).
4. L'écart entre les crêtes est compris entre 0,5 et 2,5mm
5. Stries et sillons défauts périodiques ou pseudopériodiques, (échelle microscopique) l'écart entre les crêtes est inférieur ou égal à 0,5 mm
6. Défauts localisés (échelle microscopique) : marque d'outil, arrachement, fente, piquûre.
7. Structure cristalline (échelle méso-scopique).
8. Réseau cristallin (échelle nano-scopique) [18], [19]

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

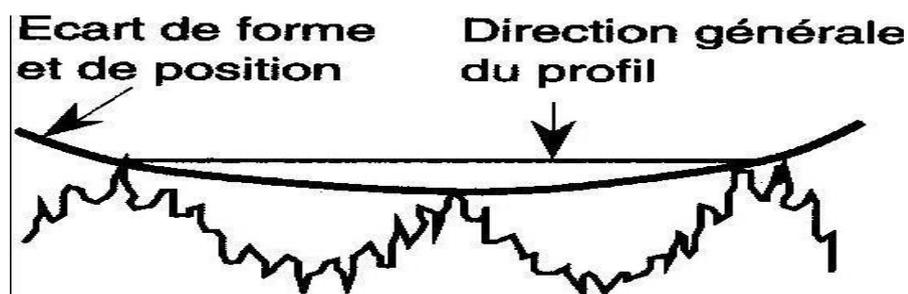


**Figure II. 2:** Les types de défauts de surface [17]

### 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 [17]

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 au cours de l'usinage due à l'effort exerce 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. [18], [19]

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

Ils sont caractérisés par une longueur d'onde de quelques millimètres. Ils sont causes 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  $w$  (valeurs à déterminer avec le bureau d'étude).

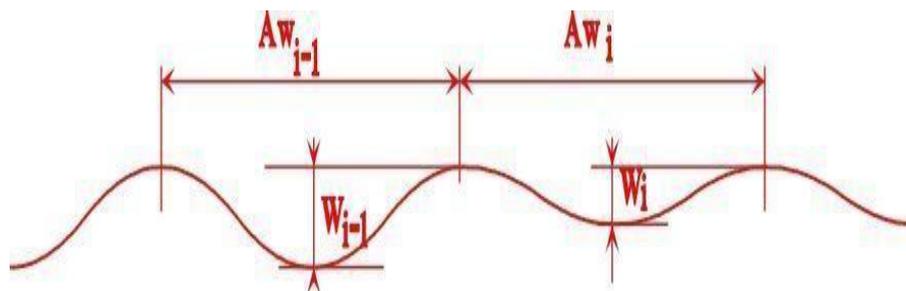


Figure II. 4 : Motif d'ondulation

Pas moyen d'ondulation :

$$A_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{w_i}$$

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 :

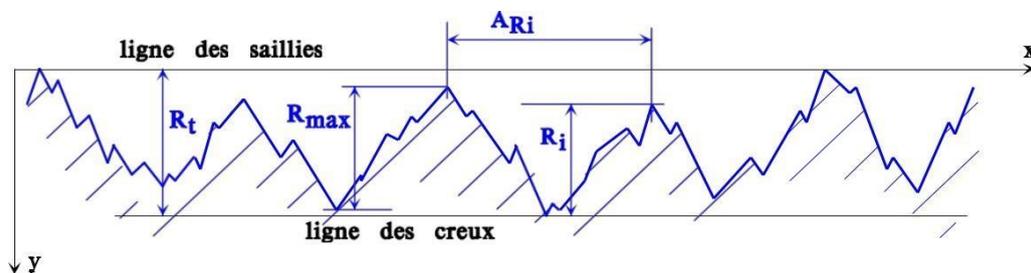
La pièce, due à un mauvais équilibrage du montage sur la porte pièce

L'outil, dû à une dent cassée au niveau de la fraise par exemple La machine. [11]

### 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 millimètres. Ils sont causés par des vibrations haute fréquence et traces des dents.

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



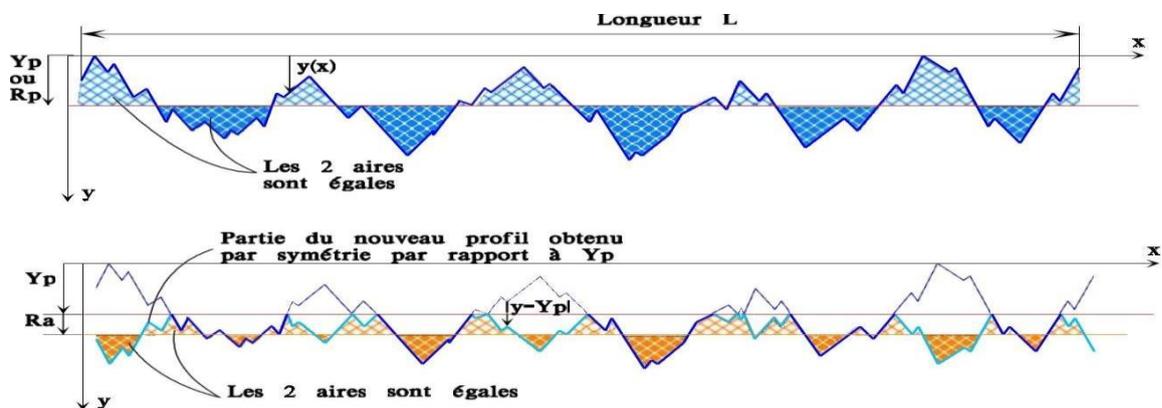
**Figure II. 5 : Profil « redressé »**

Pas moyen de rugosité  $A_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{Ri}$

Profondeur moyenne de rugosité  $R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$

Rugosité maxi:  $R_{max} = \text{Sup} \{R_i\}$

**Rugosité totale:  $R_t = \text{Ecart}$**



**Figure II. 6 : Profondeur d'aplanissement de rugosité :  $R_p$  ; écart moyen par rapporte au linge moyenne de rugosité :  $R_a$  [17]**

L'influence de ces défauts ont eu 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). [18]

### 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...).



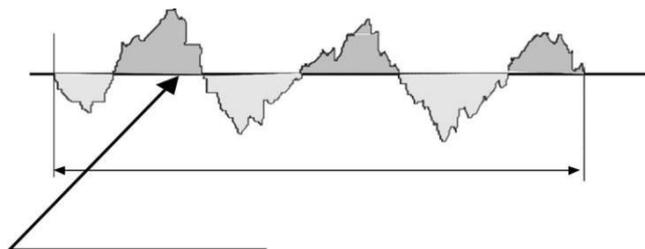
Figure II. 7 : arrachement de matière [17]

## II.4. Différents types de lignes

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

### II.4.1. Ligne moyenne

Cette droite a la direction générale du profil



Ligne moyenne telle que les aires = Longueur de base  $\times$  1

Figure II. 8 : la ligne moyenne [17]

### II.4.1.1. Longueur de base et 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.  $L = n \times l$  avec  $n$  entier

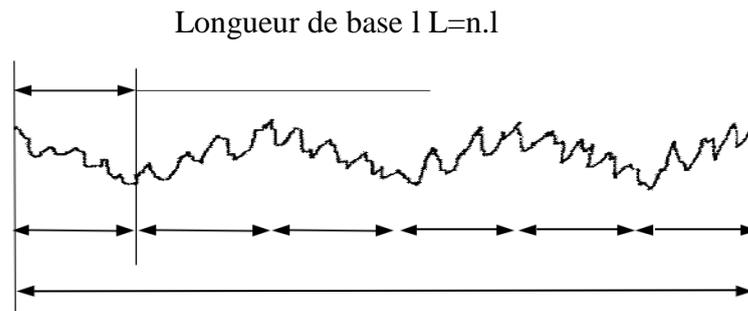


Figure II. 9 : la présentation de la longueur de base [17]

### II.4.2. Ligne de référence

C'est la ligne par rapport à laquelle les paramètres du profil seront déterminés. En général, cette ligne n'appartient pas à la surface de référence, c'est la ligne moyenne. Elle peut être définie par :

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

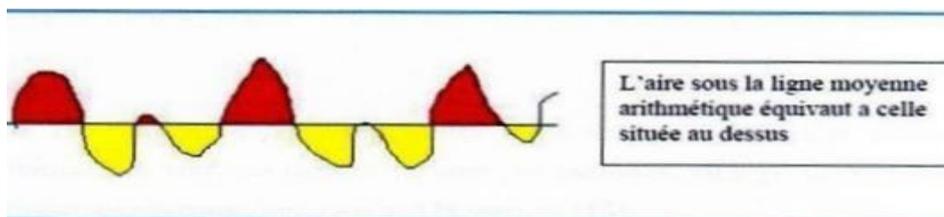


Figure II. 10 : Ligne des moindres carrés [20]

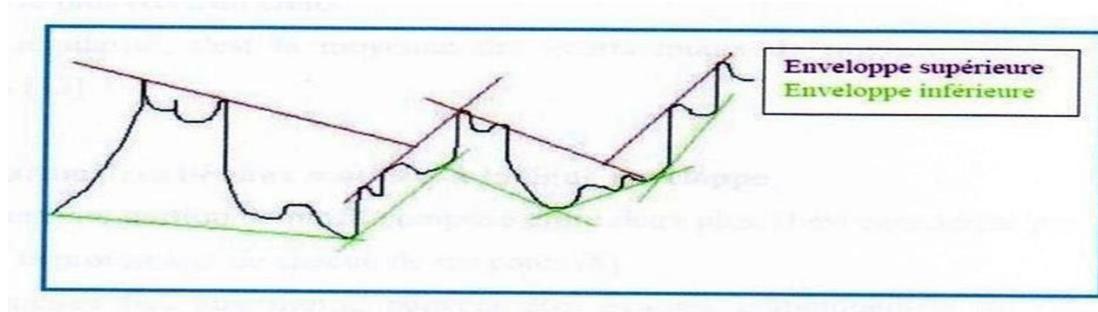
Ligne centrale arithmétique à l'intérieur de la longueur de base est la somme des aires comprises entre elle et le profil est égale de part et d'autre. [17]

### 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. [17]

### 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). [21]



**Figure II. 11** : Ligne enveloppe inférieure et supérieure [20]

### II.5. Paramètres de rugosité unidimensionnelle

Les paramètres de rugosité unidimensionnelle standardisés peuvent être évalués avec l'outil La texture unidimensionnelle 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 [17]

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

### II.6. 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:

#### a-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.

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  $R_a$ . [21]

#### b-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. [21]

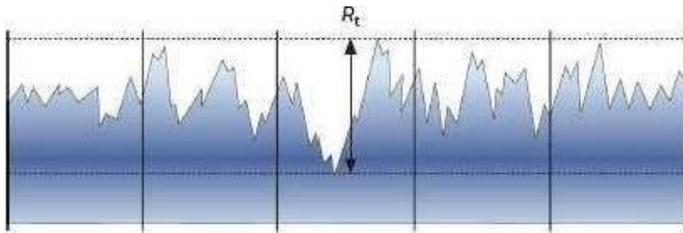
$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_j^2}$$

### c-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. [21]

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



Exemple d'indication donnée sur les dessins :  $\sqrt{R_t 4}$

**Figure II. 12** : Hauteur maximale du profil  $R_t$  [22]

### d-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. [21]

$$R_v = \left| \min_{1 \leq j \leq N} r_j \right|$$

### e- Hauteur maximale des pics $R_p$

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

$$R_p = \left| \max_{1 \leq j \leq N} r_j \right|$$

1997. Pic le plus élevé. Il s'agit de la hauteur du pic le plus élevé de la longueur d'évaluation [21]

### f-Amplitude moyenne $R_{tm}$

Profil de rugosité sur la 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 d'évaluation la plus profonde sur plusieurs échantillons le long de la longueur où  $R_{vm}$  et  $R_{pm}$  sont définis plus bas.

Pour les profils de données elle est basée sur cinq longueurs d'échantillon ( $m = 5$ ). Le nombre

d'échantillons correspond à la norme ISO. [21]

### **g-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 [21]

$$R_{vm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_{vi}$$

Où

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

### **h-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. [21]

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

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

### **i-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. [21]

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

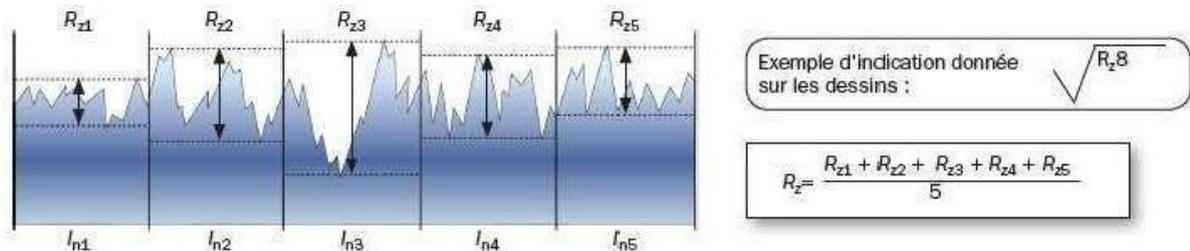
Normes : ISO 4287-1997.

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. [21]

### k-Hauteur maximale moyenne Rz

Normes : ISO 4287-1997

Moyenne des valeurs absolues des cinq plus hauts pics et des cinq plus basses vallées sur la longueur d'évaluation. [21]



**Figure II. 13 : Hauteur maximale moyenne Rz [22]**

### l-Amplitude crête-à-crête moyenne RzISO

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. Les valeurs sont moyennées. Elle est identique à Rtm.

Échantillonnées puis ces 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. [21]

### l-Asymétrie Rsk

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 [21]

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

### II.7. 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. [21]

#### II.7.1. Paramètres liés aux motifs et à la ligne enveloppe

Le motif est une portion de profil comprise entre deux pics, il est caractérisé par sa largeur ou pas et par la profondeur de chacun de ses cotés [23]

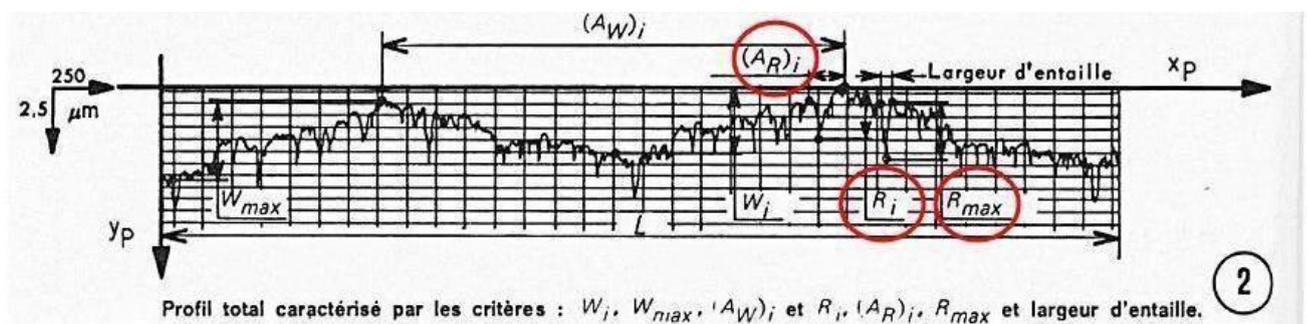
Les paramètres liés aux motifs peuvent être évalués graphiquement en traçant la ligne enveloppe supérieure et la ligne enveloppe inférieure.

Ces motifs déterminent la profondeur moyenne de rugosité R et son pas moyen AR (Figure II.14).

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

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

La ligne enveloppe supérieure 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. 14** : profil total caractérisé par les critères :  $W_i$ ,  $W_{max}$ ,  $(AW)_i$  et  $R_{max}$  et largeur d'entaille [3]

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

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

### II.7.2. Paramètres liés à la ligne moyenne

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

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

#### 1. Au niveau de la longueur de base :

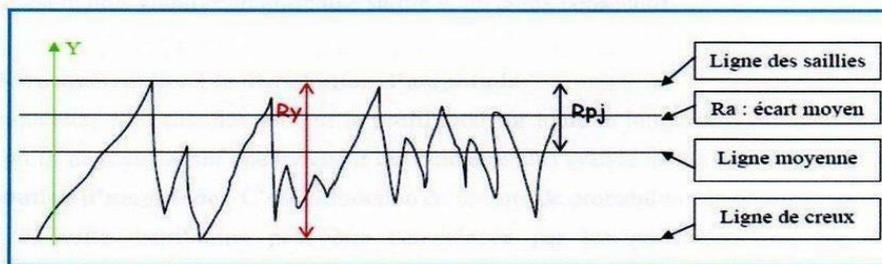


Figure II. 15 : Paramètre liés a la longueur de bas [4]

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

$R_{aj}$  : écart moyen Arithmétique du profil

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

$R_p$  : Représente lamoyenne des  $R_{pj}$

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

$R_t$  : c'est le plus grand des  $R_y$  ( $R_y$  étant dans la longueur de base, on choisit le plus grand.

$R_y$  compris dans la longueur d'évaluation). On considère que  $R_t$  est plus au moins équivalente à  $R_y$

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

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

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

### 2. Au niveau de la longueur d'évaluation

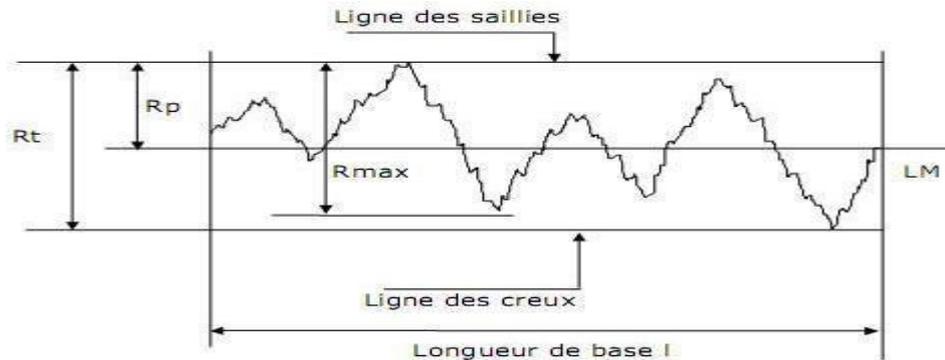


Figure II. 16 : Paramètres liés à la longueur d'évaluation [3]

### II.7.3. Paramètres liés à la distribution d'amplitude

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

### II.7.4. 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. [4]

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

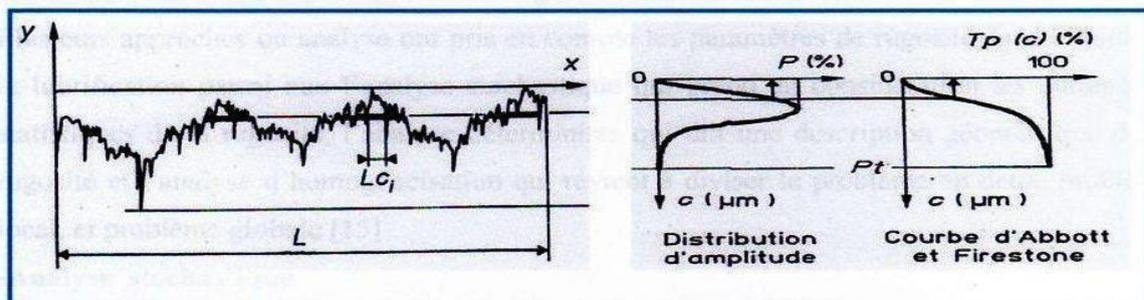


Figure II. 17 : Paramètres liés à la distribution d'amplitude [4]

C : (nm) profondeur de coupe

Lci : longueur de coupe élémentaire

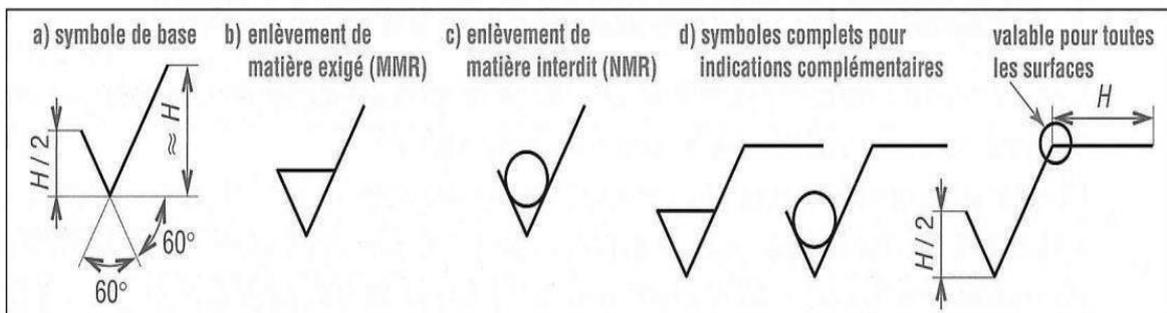
P : (%) densité de probabilité des points du profil Pt : profondeur totale du profil Tp (C) : taux de longueur portante (% de longueur portante après une

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 connaître la topographie de surface est devenu

### II.8. Les spécifications normalisées

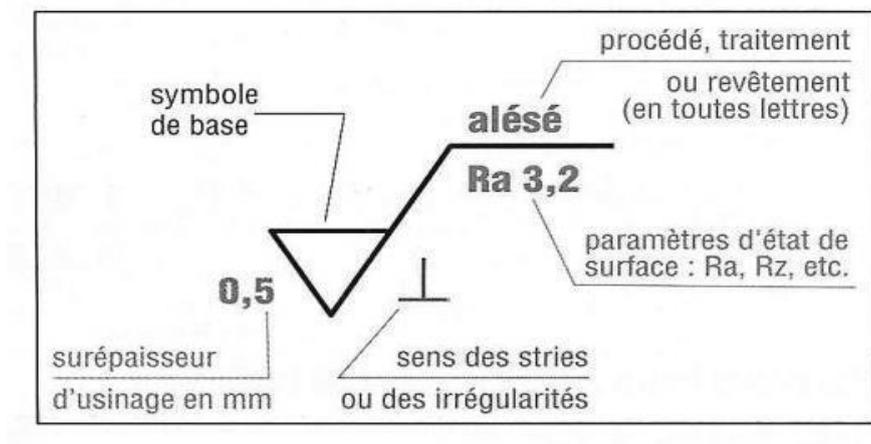
Sur les dessins de définition, les états de surface peuvent faire l'objet de spécification.

Un symbole graphique est utilisé :



**Figure II. 18** : symbole graphique de l'état de surface [22]

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



**Figure II. 19** : Exemple de symbolisation [22]

### II.9. Généralité sur les techniques d'amélioration des états de surface

#### II.9.1. 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.

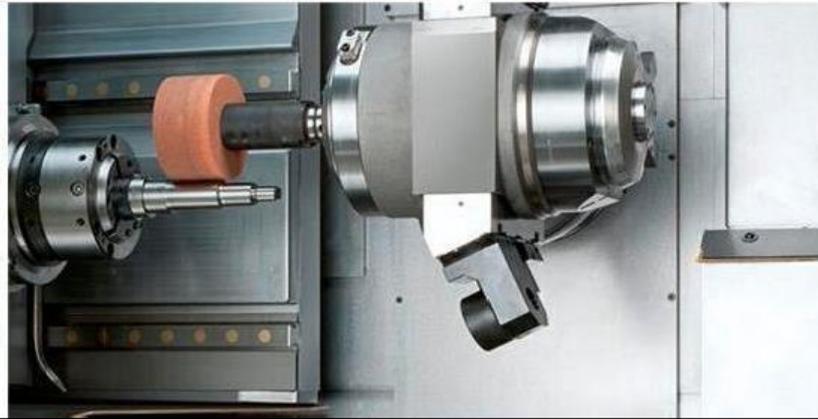


Figure II. 20 : opération de la Rectification [6]

##### II.9.1.1. 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 révolution ou cône).

Une surface d'une forme parfaite (en général : plan, cylindre de

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 brûlures sur les pièces produites ce liquide refroidi les pièces pour ne pas avoir un mauvais état de surface. [13]

### II.9.1.2. Matériaux

Il est possible de rectifier :

1. Acier classique non trempé
2. Acier trempé jusqu'à 70 HRC
3. Acier chromé dur
4. Céramique
5. Carbure
6. Plastique

### II.9.1.3. Avantage de la rectification

a-Possibilité de s'attaquer aux matériaux les plus durs

b-Pouvoir atteindre des tolérances dimensionnelles de l'ordre du micromètre (0,001mm) et donc d'usiner des pièces plus précises

c-Obtenir un état de surface poussé ( $< 0,1 \text{ Ra}$ ) [12]

### II.9.2. 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  $1\ 000\text{ °C}$  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 super finition consiste à enlever la couche de Beilby, de manière à faire disparaître les stries et les défauts géométriques. La différence essentielle entre super finition 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]

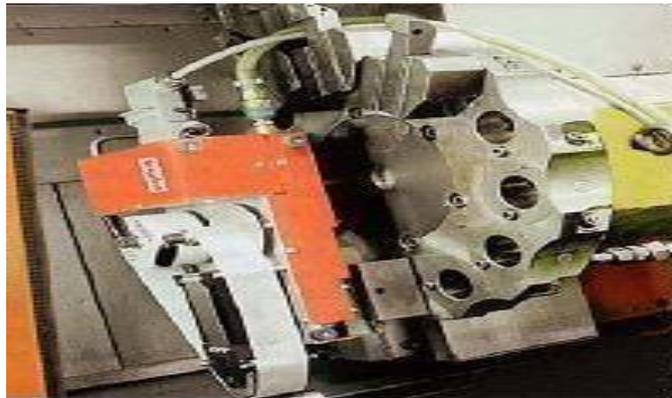


Figure II. 21 : opération de super finition [13]

### II.9.3. Galetage

Le galetage est un procédé d'usinage sans enlèvement de matière qui consiste 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...

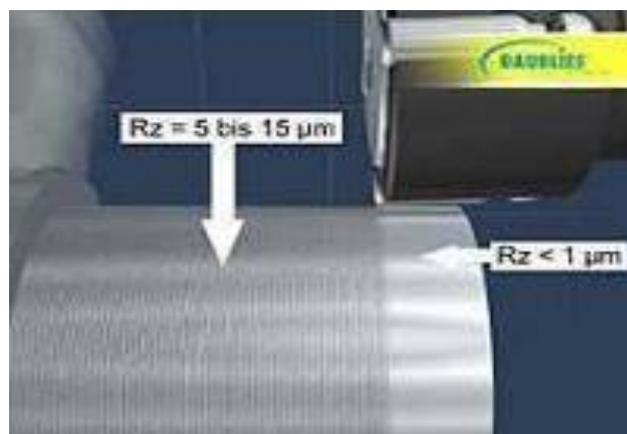


Figure II. 22 : opération de galetage [13]

### II.9.4. Rodage

Principe : Procédé par abrasion qui consiste à un frottement de deux pièces entre les quelles 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.

### II.10. Avantages de la lubrification



**Figure II. 23** : 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.10.1. 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.10.2. 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.11. 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.12. Composition 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 formateurs, qui font appel à de nombreux produits de base (composés type huile minérale, issus de la distillation du pétrole, graisses animale, huile végétale ou autres matières premières).

On peut distinguer parmi ces fluides :

- Les fluides de type émulsion
- Les fluides type micro-émulsion
- Les fluides synthétiques

#### II.12.1. huiles entières

Huiles minérales, additives ou non

#### II.12.2. fluides de type émulsion

Les fluides de type émulsion contiennent en Général:

Une base type huile minérale ou alkyl benzène Un émulateur

Un agent anticorrosion

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.12.3. fluides de type microémulsion

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

- une base huile minérale ou alkyl benzène
- un émulateur anticorrosion
- des additifs anti mousses
- 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.12.4. 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 cancérigènes ou des allergisants respiratoires.

Par ailleurs, le contact cutané avec ces mêmes fluides est susceptible de provoquer des dermatites ou des lésions eczématiformes convient donc :

De vérifier régulièrement la qualité des fluides utilisés.

D'éviter tout contact cutané avec ces produits.

D'assainir les postes de travail, à l'aide notamment de ventilations efficaces. [14]

# ***CHAPITRE III***

## ***Partie expérimentale***

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale qui consiste en une présentation du matériel qui sert à l'étude expérimentale. Les mesures concernent la rugosité de surface ainsi que les conditions de coupe. [25]

### III.2. Equipements et préparations des expériences

Pour la réalisation des expériences, il est nécessaire de préparer les équipements, l'éprouvette ainsi que les outils de coupe.

### III.3. Expériences et machines-outils utilisés

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

### III.4. Matériau utilisé

XC48

#### III.4.1. Analyse chimique moyenne :

	C %	Mn %	Si %	S %	P %
XC 48	0,50 - 0,52	0,50 - 0,80	0,40 maxi	$\leq 0,035$	$\leq 0,035$

Tableau III .1 : composition chimique

#### III.4.2. Propriétés physiques et mécaniques

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 par sa bonne usinabilité et ses caractéristiques mécaniques et son aptitude 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.4.3. Caractéristiques

État normalisé :

	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	Re (N/mm <sup>2</sup> )	A %
XC 48	560 / 620	275 / 340	14 / 16

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

### III.5. Machine-outil utilisées

L'usinage a été réalisé au complexe SIDER EL HADJAR, On a utilisé un tour à commande numérique de type : **Tour modèle 16K20 CNC fabriqué en RUSSIE.**

#### III.5.1. Caractéristiques techniques et dimensions

Encombrement : 4030x2300x1700 mm

Poids de la machine :4300kg

Mandrin auto centreur a trois mors : 7102-0072-1-2

Diamètre extérieure D, mm : 250

Hauteur du corps L, mm : 90

Diamètre extérieur de la pièce montée en mors à l'endroit, mm :

-minimal : 20

-maximal : 200

Diamètre intérieur de la pièce montée en mors à l'endroit, mm :

-minimal : 70

-maximal : 230

Tourelle automatique a 6 positions YR9321

Encombrement, mm : 600\*315\*276

Masse, kg : 2

Moteur d'entraînement principal: tension - 220/380 V, vitesse - 2500 tr / min, puissance 11 kW, type – MIFI32.

Nombre de moteurs : 9

Type du moteur de la station de lubrification de trainard : 4AA56A4

Puissance du moteur de la station de lubrification de trainard, KW : 0.12

vitesse du moteur de la station de lubrification de trainard, tr/min : 1400

Type de la pompe d'arrosage : X14-22N

Puissance de la pompe d'arrosage, KW : 0.12

Débit de la pompe d'arrosage, l/min : 22

vitesse de la pompe d'arrosage, tr/min : 2800

Type du moteur de lubrification de la poupée avant : BP-11-11A

Puissance du moteur de lubrification de la poupée avant, KW : 0.27

vitesse du moteur de lubrification de la poupée avant, tr/min : 1380

Type des moteurs d'avance :

-longitudinale : P0445.4.12

-transversale : P0445.2.12

Puissance des moteurs d'avance, KW :

-longitudinale : 2

-transversale : 1.1

Vitesse des moteurs d'avance, tr-min : 1200

Type du moteur du porte outil : 4AB63B4

-puissance du moteur de la porte outil, KW : 0.18

-vitesse du moteur de la porte outil, tr/min : 1400

Puissance sommaire de tous les moteurs, KW : 15

Puissance sommaire consommée par la machine-outil, KW : 17

Désignation de la commande numérique : ALPHA2

Système de lecture : absolu et incrément

Type de capteur de rétroaction : R0426

Type de capteur de filetage : R0426

Mode d'introduction des données : clavier

Nature de courants : alternatif

Tension : 220

Fréquence : 50

Puissance, KW : 20



**Figure III.1 :** Tour à commande numérique modèle 16K20 fabriqué en RUSSIE.

### III.5.2. Outil de coupe utilisé

Outil à tronçonner et outil à charioter et dresser



**Figure III. 2 :** outil à charioter et dresser/outil à tronçonner

Les outils de coupe utilisent des plaquettes en carbure amovibles de la marque KENNA-METAL de forme carrée, à fixation par trou central avec les caractéristiques suivantes :

Diamètre du cercle inscrit	<b>12.7 000mm</b>
Désignation ISO	<b>CNMG120408RN</b>
Longueur effective du tranchant	<b>12.9000mm</b>
Revêtement	<b>PVD, TiALN + TiN</b>
Angle de dégagement majeur	0 degré
Rayon de coin	<b>0.7940mm</b>
Épaisseur d'insertion	<b>5.1600mm</b>
N° material	<b>5387664</b>

**Tableau III.3.** : Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées

### III .5.3. Régime de coupe

Le régime de coupe a été choisi en fonction du matériau utilisé et de l'outil de coupe employé lors de la réalisation de la pièce demandée. Les régimes de coupe adoptés dans cette dernière, sont consignés dans le tableau suivant :

Niveau	Vitesse de coupe Vc (m/min)	Avance f (mm/tr)	Profondeur de passe ap (mm)
<b>1</b>	<b>140</b>	<b>1.2</b>	<b>1.5</b>
<b>2</b>	<b>245</b>	<b>0.4</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>330</b>	<b>0.2</b>	<b>0.5</b>

**Tableau III.4.** : Paramètres de coupe et leurs niveaux pour un plan de 9 essais

### III.6. Routage d'usinage :

- **Phase N° 100**  
OP N°1 : débitage 210  $\varnothing$ 70.
- **Phase N° 200**  
OP N°1 : contrôle du brut.
- **Phase N° 300**  
OP N°1 : centrage.

- **Phase N° 400**  
OP N°1 : chariotage dressage 190  $\varnothing$  55.
- **Phase N° 500**  
OP N°1 : chariotage dressage 170  $\varnothing$  50.  
  
OP N°2 : rainurage.
- **Phase N° 600**  
OP N°1 : contrôle finale de la pièce.

### III.7. Programme de la machine

G78 A41 T303	G0 Z-126
G97 S350 F0.3 M3	G1 X44
G0 X64 Z2	G0 X58
G81 X55 Z-190 R64 L-190 D1.5 H0	G0 Z-144
G0 X180 Z20	G1 X44
T606	G0 X58
G97 S300 M3 F0.3 G0 X58 Z-18	G0 Z-162
G1 X44 F0.05	G1 X44
G0 X58	G0 X180
G0 Z-36	G0 Z20
G1 X44	G78 A42
G0 X58	T606
G0 Z-54	G97 S 300 M3
G1 X44	G0 X60 Z0
G0 X58	G22 A42 B8
G0 Z-72	G90
G1 X44	G0 X180 Z20
G0 X58	M5==M2
G0 Z-90	G98 A42
G1 X44	G91
G0 X58	G1 Z-18 F0.03
G0 Z-108	G1 X-8
G1 X44	G0 X8 G99
G0 X58	

### III.8. Présentation de l'éprouvette

L'éprouvette découpée respectivement au de diamètre  $D= 55\text{mm}$  (mise en longueur), et préparées en 9 paliers.

Les pièces de longueur  $L= 170\text{mm}$  et diamètre  $D= 50\text{mm}$  et réalisées en 9 paliers (usinée sans lubrification). Largeur du palier  $15\text{mm}$ , Séparé par des gorges de profondeur de  $3\text{mm}$  et largeur de  $3\text{mm}$ .

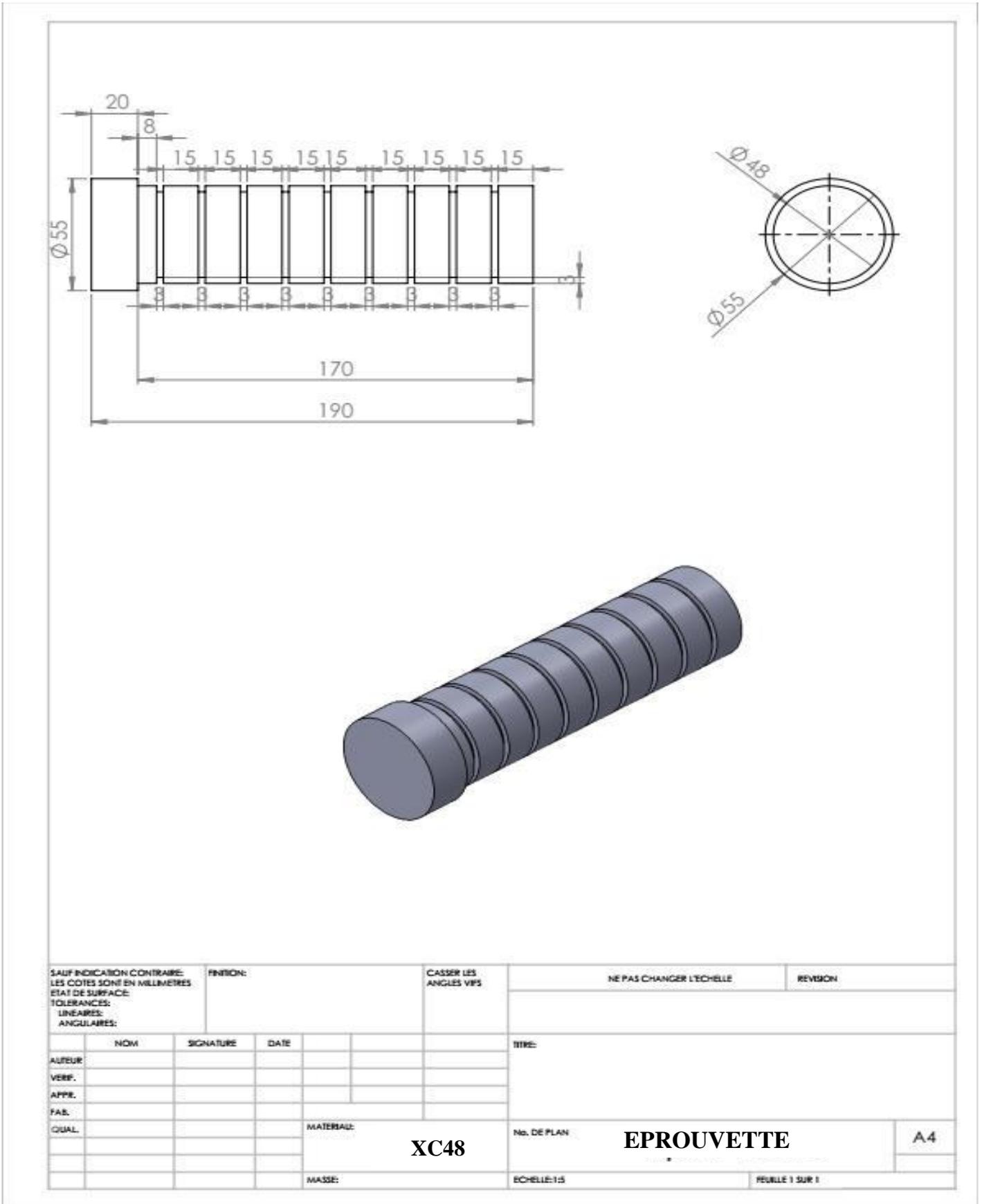


Figure III. 3 : Dessin de définition de la pièce

### III.9. Rugosimètre utilise

Instrument de mesure portable qui vous permet de mesurer facilement et avec précision la rugosité de la surface.

Le SurfTest SJ-210 vous offre les avantages suivants:

- Fonctions avancées d'analyse et d'affichage pour navigation aisée dans les menus.
- Ecran **6 cm** [2.4 "] couleur, LCD rétro-éclairé qui vous donne une excellente lisibilité.
- Il est conforme à de nombreuses normes, y compris la norme EN ISO, VDA, ANSI, JIS, ainsi que des paramètres personnalisés.
- Différents pilotes permettent d'élargir la gamme d'applications.
- Les résultats des calculs, des profils évalués, des courbes d'amplitude peuvent être affichés.
- Opération par touches sur l'avant et sous le couvercle coulissant.

#### III.9.1. Caractéristiques techniques

Force de mesure du stylet:	0.75 mN
Stylet angle:	60°
Rayon de la pointe du stylet:	2 µm
Poids:	500 g
Capacité de mesure:	16 mm 4,8 mm [Type S]
Longueur max. d'évaluation:	17.5 mm, 5.6 mm [Type S]
Vitesse de mesure:	0.25 mm/s; 0.5 mm/s; 0.75 mm/s
Longueur de câble:	1 m
Méthode de détection:	Induction différentielle
Capacité:	360 µm
Matériau du stylet:	Touche diamant
Rayon de patin:	40 mm

Profils évalués:	Profil de rugosité (R), Motif R, Profil DF et plus
Normes de rugosité:	EN ISO, VDA, JIS, ANSI et réglages personnalisés
Nombre de base:	x 1, x 3, x 5, x L
Filtre:	Gauss, 2CR75, PC75
Longueur de cut-off:	$\lambda_c$ : 0.08 mm; 0.25 mm; 0.8 mm; 2.5 mm $\lambda_s$ : 2.5 $\mu\text{m}$ ; 8 $\mu\text{m}$
Evaluation de la tolérance:	Limite haute/basse colorée
Alimentation:	Via un adaptateur secteur (DC 7,5V 1,5W) intégré ou batterie. rechargeable
Fonctions:	Commutable entre 16 langues: japonais, anglais, allemand, français, italien, espagnol, portugais, tchèque, polonais, hongrois, turc, suédois, néerlandais, coréen, chinois traditionnel, chinois simplifié
Extinction automatique :	Automatique après 30 secondes
Unité de mesure:	Métrique



**Figure III.4 :** Dispositif pour mesurer la rugosité



**Figure III.6. :** Capteur de rugosimètre

La pointe en diamant (palpeur) se déplace linéairement sur la surface usinée, Les mesures sont répétées à trois reprises à  $120^\circ$  et le résultat final est une moyenne de ces valeurs.

### III.10. Conditions de coupe

Plusieurs facteurs influents sur le système d'usinage, dans notre travail nous nous sommes intéressés à cet ensemble d'éléments : vitesse de coupe ( $V_c$ ), avance par tour ( $f$ ), profondeur de passe ( $a_p$ ).

Le paramètre de sortie (résultats) à observer sont: la rugosité de surface ( $R_a$ ).

Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais varient dans les intervalles suivants :  $V_c$  [140-330] m/min ;  $f$  [0.2-1.2] mm/tr ;  $a_p$  [0.5-1.5] mm.

### III.11. Planification des expériences

Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences, cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation du procédé de coupe.

Le type de plan choisi est celui de Taguchi car il simplifie le protocole expérimental pour mettre en évidence les effets de facteurs sur la réponse. La méthode de Taguchi se distingue par une réduction importante du nombre d'essais, tout en gardant une bonne précision.

La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs.

Dans cette étude, la table orthogonale standard L9 de Taguchi est adoptée comme plan expérimentale. Les niveaux des paramètres ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe (kennametal Company). Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le **tableau II.5. ; Et II.6.**

#### III.11.1. Résultats expérimentaux

Selon l'usinage de l'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 ( $V_c$ ), de l'avance ( $f$ ) et de la profondeur de passe ( $a_p$ ).

### III.11.2. Condition d'usinage à l'aide de :

#### ➤ Plan de taguchi

Tableau de Taguchi	L9 (3 <sup>3</sup> )
Facteurs :	3
Essais :	9

**Tableau III.5.** : Récapitulatif du plan

#### Usinage à sec

<b>Vc</b>	<b>F</b>	<b>ap</b>
140	1,2	1,5
140	0,4	1
140	0,2	0,5
245	1,2	1
245	0,4	0,5
245	0,2	1,5
330	1,2	0,5
330	0,4	1,5
330	0,2	1

**Tableau III.6.** : Condition d'usinage

### III.11.3. Résultats des essais :( à l'aide de Minitab)

Dans le tableau suivant :

## Chapitre III: partie expérimentale

palier	Paramètres d'entrée (facteurs)			paramètre de sortie (réponses)				
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	Ap (mm)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Rp ( $\mu\text{m}$ )	Rq ( $\mu\text{m}$ )
1	140	1,2	1,5	4.301	33.099	25.516	13.277	6.398
				4.159	30.764	25.438	13.714	6.258
				3.576	28.240	22.797	13.886	5.680
				<b>Moy : 4.012</b>	<b>30.701</b>	<b>24.583</b>	<b>13.625</b>	<b>6.112</b>
2	140	0,4	1	3.296	27.478	18.642	8.545	4.136
				3.366	23.875	19.755	8.520	4.223
				2.294	25.495	14.236	5.714	3.043
				<b>Moy : 2.985</b>	<b>25.616</b>	<b>17.544</b>	<b>7.593</b>	<b>3.800</b>
3	140	0,2	0,5	3.025	22.199	16.921	7.345	3.705
				2.915	25.630	16.446	6.798	3.656
				2.865	24.105	17.217	8.072	3.658
				<b>Moy : 2.935</b>	<b>23.978</b>	<b>16.861</b>	<b>16.861</b>	<b>3.673</b>
4	245	1,2	1	2.810	20.492	15.888	6.994	3.439
				3.338	25.086	19.349	7.277	4.224
				1.740	16.690	11.349	5.316	2.234
				<b>Moy : 2.629</b>	<b>20.756</b>	<b>15.528</b>	<b>6.529</b>	<b>3.299</b>
5	245	0,4	0,5	2.089	17.034	13.503	5.806	2.658
				2.203	16.850	15.406	6.046	2.942
				2.266	17.083	13.277	6.334	3.019
				<b>Moy : 2.186</b>	<b>16.989</b>	<b>14.062</b>	<b>6.062</b>	<b>2.873</b>
6	245	0,2	1,5	1.441	13.554	9.027	4.651	1.942
				1.655	12.844	9.810	5.111	2.069
				1.661	11.983	9.740	5.033	2.072
				<b>Moy : 1.585</b>	<b>12.793</b>	<b>9.525</b>	<b>4.931</b>	<b>2.027</b>

7	330	1,2	0,5	2.778	20.010	16.741	6.532	3.599
				2.986	19.864	15.036	6.253	3.131
				2.675	20.841	17.576	7.005	3.878
				<b>Moy : 2.813</b>	<b>19.150</b>	<b>16.451</b>	<b>6.596</b>	<b>3.536</b>
8	330	0,4	1,5	1.901	13.361	10.741	5.489	2.350
				1.872	11.658	12.036	5.468	2.475
				1.915	12.358	11.876	4.976	2.291
				<b>Moy : 1.896</b>	<b>12.459</b>	<b>11.551</b>	<b>5.311</b>	<b>2.372</b>
9	330	0,2	1	1.630	11.123	8.854	4.272	1.994
				1.170	8.668	6.759	3.554	1.424
				1.469	12.129	7.953	4.004	1.865
				<b>Moy : 1.423</b>	<b>10.640</b>	<b>7.855</b>	<b>3.943</b>	<b>1.761</b>

Tableau III.7. : Résultats d'essai

### III.11.4. Représentation graphique

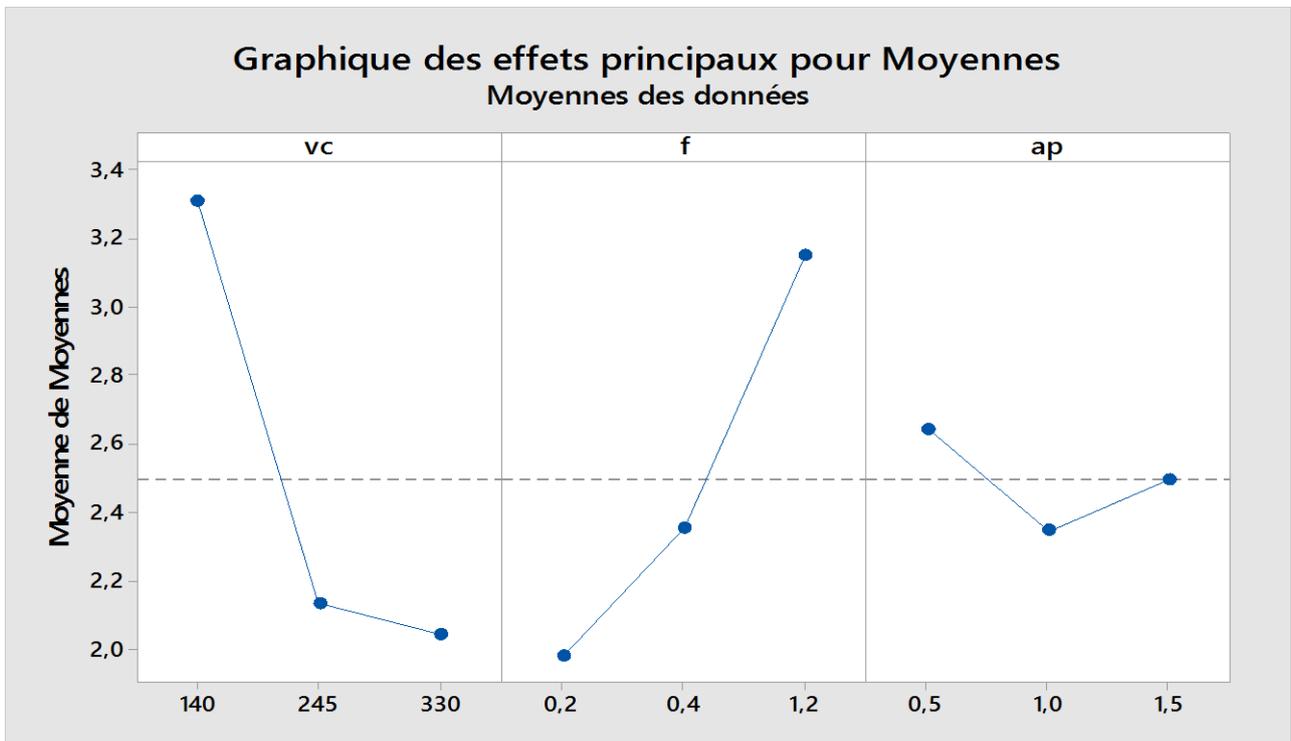


Figure III.7 : représentation graphique des paramètres de coupe en fonction de Ra

A partir des courbes obtenus dans **fig III.7**, nous pouvons dire que :

L'augmentation de la vitesse de coupe a un effet positif sur l'état de surface (effet inversement proportionnel  $v_c \nearrow Ra \searrow$ ) par contre l'effet de l'avance est négatif (directement proportionnel  $f \nearrow Ra \nearrow$ ). Alors que  $a_p$  affecte légèrement la rugosité de surface  $Ra$ .

### III.11.5. Analyse de régression pour $Ra$

- **Coefficients**

Terme	Coeff	Coef ErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
<b>Constante</b>	3,602	0,495	7,28	0,001	
<b>Vc</b>	-0,00684	0,00149	-4,60	0,006	1,00
<b>F</b>	1,120	0,267	4,19	0,009	1,00
<b>Ap</b>	-0,147	0,283	-0,52	0,626	1,00

**Tableau III.8.** : Coefficients de constante

#### Equation de régression

$$Ra = 3,602 - 0,00684 v_c + 1,120 f - 0,147 a_p$$

### III.12. Discussions

L'étude de la rugosité de surface de l'acier de nuance XC48 et l'influence de régime de coupe sur sa qualité de surface fait l'objet de ce mémoire.

Dans notre étude les paramètres variables choisis sont la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe.

Les paramètres de rugosité obtenus  $R_a$  sont regroupés dans (**tableau III.7**) et les graphes de la rugosité en fonction de (la vitesse de coupe, l'avance et profondeur de passe  $R_a = F(V_c)$ ,  $R_a = F(f)$  et  $R_a = F(a_p)$  respectivement) sont établis (**Figure III.5**).

La qualification de l'ouvrier, le choix de la machine et la matière de la pièce joue aussi un rôle très important dans l'obtention des résultats qui réponse aux exigences.

On peut conclure que les résultats expérimentaux obtenus sont Idéals spécialement pour le palier (9) qui donne  $R_a=1.423$ .

#### ➤ L'influence de $v_c$ , $f$ et $a_p$ sur la rugosité:

Selon le tableau de rugosité obtenus en variant les paramètres de coupe, on peut déjà constater dans quel essai le résultat est parfait.

Sur ce on peut considérer notre résultat comme résultat idéal, les paliers (6), (8), (9) et (5) donnent  $R_a=1.585$ ,  $1,896$ ,  $1.423$  allant jusqu'à  $2.186$ , les rugosités peuvent être acceptées.

Le régime de coupe pour les paliers (1), (2) et (3) est à exclure suite aux mauvais résultats obtenus (rugosité médiocre).

### III.13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait le point sur les équipements utilisés lors de nos travaux. On a désigné les caractéristiques des matériaux de coupe et la composition chimique du matériau usiné, comme on a présenté les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences.

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 la rugosité dépend directement de la vitesse de coupe et en particulier de l'avance.

Le choix de la géométrie de l'outil ainsi que celui d'une machine-outil précise sont requis.

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

### Références bibliographiques

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.].
- (5) Madani Mohammed Saïd et Ghouini Rabah, Mémoire de fin d'étude d'un diplôme de Master thème Amélioration des paramètres Technologiques de coupe en tournage.
- (6) Utilisation d'un tour <http://serge79.over-blog.com/article-la-vitesse-de-coupe-45528985.html>.
- (7) Dr Lakhdar BOUZID thèse doctorat -Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13-(2015)\*
- (8) ALLAL Mohammed, Mémoire de fin d'étude d'un diplôme de Master Optimisation des conditions de coupe lors de l'usinage de l'acier AISI 52100 en utilisant la méthode RSM et l'approche de Taguchi.
- (9) BOUSSAID Khawla, Mémoire de fin d'étude d'un diplôme de Master Prédiction des paramètres technologiques d'usinage en tournage de l'acier inoxydable AISI 304 par la méthodologie de surface de réponse. (2017)
- (10) 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
- (11) Alexandre Toumine, «Cours D'Usinage », Groupe Conception Production, INSA de Lyon, France
- (12) Nair, A., Govindan, P., & Ganesan, H. (2014). A comparison between different optimization techniques for CNC end milling process. Procedia Engineering, 97, 36- 46.
- (13) Ramanujam, R., Venkatesan, K., Saxena, V., Pandey, R., Harsha, T., & Kumar, G. (2014). Optimization of Machining Parameters Using Fuzzy Based Principal Component Analysis during dry turning operation of Inconel 625–A hybrid approach. Procedia Engineering, 97, 668-676.

## Références bibliographiques

---

- (14) Rathore, S. K., Vimal, J., & Kasdekar, D. K. (2018). Determination of optimum parameters for surface roughness in CNC turning by using GRA-PCA. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 10(2), 37-49.
- (15) Rocardier, « Cours sur le Tournage - Usinage Cours Technologie »,2011.
- (16) F. Valiorgue, 2008. Simulation des processus de génération de contraintes résiduelles en tournage du 316L. Nouvelle approche numérique et expérimentale, Thèse de doctorat, Ecole Supérieure des Mines de Saint-Etienne 2008.
- (17) 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'ingénierie des Matériaux de Bretagne LIMATB Université de Bretagne Sud, 14<sup>ème</sup> Colloque national de la recherche en IUT Lyon 2008.
- (18) Construction mécanique -1.dessin conception et normalisation – AFNOR NATHN les pages :28.29.
- (19) Bourbia mounira, influence des procédés d'usinage sur les rugosités de surface et leurs répercussions sur un contact mécanique, thèse de magister 2009 Département de Mécanique faculté des sciences de l'ingénieur Université Badji Mokhtar Annaba.
- (20) 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.
- (21) Polycopié - Coupe des Métaux1- Master, Fabrication Mécanique et Productique Université Badji Mokhtar 2018.
- (22) G. Poulachon, A. Moisan, I.S. Jawahir, On modeling the influence of thermo-mechanical behavior in chip formation during hard turning of 100Cr6 bearing steel, *CIRP Annals - Manuf. Tech.* 50 (2001) 1 31-36.
- (23) G.S. Sekhon, J.L. Chenot, Numerical simulation of continuous chip formation during non-steady orthogonal cutting, *Eng. Comput.* 10 (1993).
- (24) effets des paramètres de coupe sur le comportement en fatigue. (n.d.-a). Retrieved June 7, 2022, from <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/12287/1/Ms.GM.Yazit.pdf>
- (25)[https://dspace.univguelma.dz/jspui/bitstream/123456789/10283/1/ZOUAIDIA khaled.pdf](https://dspace.univguelma.dz/jspui/bitstream/123456789/10283/1/ZOUAIDIA%20khaled.pdf).