

République Algérienne Démocratique Et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieure et de la recherche Scientifique

Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou

Faculté de Génie de la construction

Département de Génie Mécanique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en génie mécanique

Option : Fabrication mécanique et productive

Thème

**Etude de l'influence des paramètres de coupe sur
La précision de l'état de surface obtenue par usinage
En tournage**

Réalisé par :

Mr. ISSAADI Madjid

Mlle. MERABTINE AMIRA

Dirigé par :

Mr. R. BOURAS

Encadré par :

- ZIANI Houcine
- ASMA Farid

Promotion: 2015

Remerciements

Nous remercions Dieu pour nous avoir donné la volonté nécessaire afin d'accomplir ce modeste travail.

Nous remercions nous très chers parents pour leur aide et soutien.

*Nous aimerions tout d'abord témoigner de la profonde reconnaissance à notre promoteur **Mr. Bouras**, pour le soutien qu'il nous a apporté afin que notre projet s'achève dans les meilleures conditions possibles.*

Nos vifs remerciements et reconnaissance aux responsables de hall technologie de oued aissi pour nous avoir grand ouvert leur portes et nous avoir fait don de leur temps et de leurs expériences.

D'autre part, nous remercions tous nos collègues durant toutes ces années d'études spécialement la promo de 2année Master f.M.P et ainsi que tous nos ami(e)s on particulier AOUIDAD .H.

Nous sommes aussi reconnaissants á tous les enseignants qui ont contribué à notre réussite.

Nous remercions également les membres de jury qui feront l'honneur de juger notre travail d'apporter leurs réflexions et suggestions scientifiques.

Enfin, nous remercions également tous ceux qui nous ont aidés et soutenus de près ou de loin, par leur ouvrages, ainsi que toutes les facilités qu'ils nous ont prodiguées pour accéder à l'information et à la réussite de ce projet.

Remerciements

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- *Ma très chère famille à laquelle je dois tout.*
- *Mes chers amis (es).*
- *À tous les enseignants qui ont contribué à ma réussite durant mon parcours éducatif.*
- *À mon binôme AMIRA et toute sa famille.*
- *Toute la promotion 2014-2015.*

MADJID

Je dédie ce modeste travail à :

- *Ma très chère famille à laquelle je dois tout, et mon ange aala.*
- *Mes chers amis (es).*
- *À tous les enseignants qui ont contribué à ma réussite durant mon parcours éducatif.*
- *À mon binôme MADJID et toute sa famille.*
- *Toute la promotion 2014-2015.*

AMIRA

Sommaire

CHAPITRE I : PROCEDE DE MISE EN FORME PAR ENLEVEMENT DE MATIERE

1. INTRODUCTION.....	01
2. Principe d'usinage.....	02
2.1- Définition	02
2.2- Objectif d'usinage.....	02
2.3- travail de forme et travail d'enveloppe.....	05
3. Les différentes procédés de mise en forme par enlèvements de matière.....	07
A- par coupe à l'outil tranchant	07
A.1- Le fraisage.....	07
A.1.1- définition.....	07
A.1.2-Les principes généraux de fraisage	07
A.2-Le tournage	08
A.2.1-définition	08
A.2.2-principe de tournage	08
A.3-perçage	09
A.3.1-définition	09
A.3.2-principe perçage	10
B- par abrasion	10
B.1-définition.....	11
B.2-principe d'usinage.....	11
B.3-rectification.....	12
B.3.1-définition	12
B.3.2-Principe	13
B.4- Le rodage	15
B.4.1-Définition	15
B.4.2-Principe de rodage	15
B.5- Polissage	16
B.5.1-Définition	16
B.5.2-Principe de polissage	16
B.5.2.1- Polissage manuel.....	16
B.5.2.2- Polissage en machine	17
C- Non conventionnels	17
C.1-Définition	17
C.2-Jet d'eau	17
C.3-Laser.....	18

CHAPITRE II : LE TOURNAGE

4. Historique.....	19
5. Les types de tour utilisés dans l'industrie.....	19
6. Le principe du tournage.....	20
7. Les opérations de base en tournage.....	20
8. Principaux éléments d'une pièce en tournage.....	22
9. Paramètres de coupe en tournage.....	23
a. Vitesse de coupe.....	23
b. Vitesse d'avance.....	24
c. Mouvement relatif (outil/pèce).....	25
d. Mouvement de coupe.....	25
e. Mouvement d'avance.....	25
f. Profondeur de coupe.....	26
10. Géométrie de l'outil de coupe en tournage	27
a. Plans de l'outil.....	27
b. Angles de l'outil.....	27
c. Angle de coupe latéral.....	30
d. Angle de dépouille latéral.....	31
e. Rayon du bec.....	31
f. Angle de pointe de l'outil.....	32
11. Choix d'un outil de coupe à plaquette rapportée.....	32
a. Dimensions et type de porte-plaquette.....	32
b. Forme et dimensions de la plaquette.....	34
12. Matériaux utilisés pour les outils de coupe.....	34
a. Les carbures non revêtus	35
b. Les carbures revêtus	36
c. Les cermets.....	36
d. Les céramiques.....	37
e. Le nitrure de bore cubique.....	37
f. Les diamants poly-cristallines.....	38

CHAPITRE III: Etude et mesure de l'état de surface

1. Nécessité de l'étude des états de surface	39
2. Terminologie	39
➤ Surface géométrique	40
➤ Surface spécifiée	40
➤ Surface réelle	40
➤ Surface mesurée	40
3. Analyse d'une surface	40
4. Caractéristiques du profil.....	42
➤ La longueur d'évaluation l_n	42
➤ Longueur de base l_r	42
➤ Ligne enveloppe supérieure.....	42
➤ Ligne moyenne	42
5. Les critères d'état de surface	43
a)- Les critères physiques	43
b)- Les critères statistiques	44
6. Indications des exigences d'états de surface	45
7. Les appareils de mesure d'état de surface	48
A. Les échantillons Viso-tactiles.....	48
B. Les appareils électroniques à palpeur.....	59
C. Les appareils optiques.....	51
• Le microscope à éclairage oblique.....	51
• Le microscope interférentiel.....	52
• Le réflectomètre.....	52
8. Procédés de fabrication et états de surface.....	52
9. Exploration des méthodes de mesure.....	53
10. Conclusion.....	54

CHAPITRE IV : Paramètres influent sur la précision de l'état de surface

1. INTRODUCTION.....	55
2. Formation géométrique de surface de finition.....	55
3. Formation phénoménologique.....	57
4. Influence de la dureté du matériau usiné et usinant	57
5. Influence du taux d'écrouissage du matériau usiné.....	58
6. Influence des paramètres définissant le régime de coupe.....	58
a. Avance.....	58
b. Vitesse de coupe.....	60
c. Profondeur de passe.....	60

7. Influence de la géométrie de l'outil.....	61
a. Le rayon de bec.....	61
b. Influence du niveau de l'usure de l'outil.....	63
8. Relation entre la rugosité de la pièce, l'usure de l'outil et le régime de coupe.....	63
9. Influence des fluides de coupe.....	64
10. Influence de la rigidité de la machine-outil.....	66
11. Conclusion.....	68

CHAPITRE V: Expérimentation

1. Introduction.....	69
2. Présentation du matériel	69
a. Machine d'essai.....	69
b. Outil et porte-outil utilisés	70
c. Instruments de mesure.....	70
e. principe de mesure des états de surface du SJ201.....	71
d. Matière première.....	72
3. Préparation des éprouvettes d'essais.....	72
4. Plan des expériences.....	73
a. Variation de V_c sur les éprouvettes d'aluminium.....	74
b. Variation de f_c sur l'éprouvette d'aluminium.....	76
c. Variation de P_c sur l'éprouvette d'aluminium.....	78
d. Variation de V_c sur l'éprouvette d'acier XC45.....	80
e. Variation de f_c sur l'éprouvette d'acier XC45.....	82
f. Variation de P_c sur l'éprouvette d'acier XC45.....	85
5. Influence de la dureté de deux matériaux	87

Index des Figures

CHAPITRE I

Figure I.1	les différents procédés de mise en forme d'une pièce en fonction de l'état de la matière.....	1
Figure I.2	schéma de procédés d'usinage d'une pièce.....	2
Figure I.3	la procédure de travail d'une seule pièce.....	4
Figure I.4	la procédure de travail d'une série de pièce.....	5
Figure I.5	usinage par un travail de forme.....	6
Figure I.6	usinage par un travail d'enveloppe.....	6
Figure I.7.a	fraisage de profil.....	8
Figure I.7.b	fraisage frontal.....	8
Figure I.8	usinage en tournage.....	9
Figure I.9	Perçage.....	10
Figure I.10	principe de perçage.....	10
Figure I.11	usinage par abrasion.....	11
Figure I.12	la rectification des différentes pièces.....	12
Figure I.13	Rectification Double face.....	13
Figure I.14	rectification cylindrique.....	14
Figure I.15	Rectification plane frontale.....	14
Figure I.16.a	La pierre abrasive.....	15
Figure I.16.b	Les grains abrasifs.....	16
Figure I.17	polissage manuel.....	17
Figure I.18	usinage avec un jet d'eau.....	17
Figure I.19	le découpage laser.....	18

CHAPITRE II

Figure II .1	Tour à charioter et à fileter.....	20
Figure II .2	Opérations de base en tournage.....	21
Figure II .3.A	Opérations de contournage.....	22
Figure II .3.B	Travail d'enveloppe.....	22
Figure II .3.C	Travail de forme.....	22
Figure II .4	Surfaces de la pièce.....	23
Figure II .5	La définition des trois variables : N, Vc, D.....	24
Figure II .6	Vitesse d'avance Vf. Avance par tour f.....	24
Figure II .7	Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage.....	26
Figure II .8	Représentation de la profondeur de passe a p.....	26
Figure II .9	Plans et angles en main sur les outils courants (outil à charioter droit).	29
Figure II .10	Angles d'inclinaisons.....	30
Figure II .11	Angle de coupe latéral.....	30
Figure II .12.A	Rayon de bec d'outils.....	31
Figure II.12.B	Choix de l'angle de bec selon la profondeur de passe.....	31
Figure II .13.A	Angle de pointe de l'outil.....	32
Figure II.13.B	Choix de l'angle de pointe en fonction de la géométrie de la surface à usiner.....	32
Figure II .14	Décomposition d'un usinage.....	34
Figure II .15	Critères de choix pour la forme de la plaquette.....	34
Figure II .16	Différentes matières pour outils.....	35
Figure II .17	Carbures non revêtus.....	36
Figure II .18	Carbures revêtus.....	36
Figure II .19	Cermets.....	36
Figure II .20	Céramique.....	37
Figure II .21	Nitride de bore cubique.....	37
Figure II .22	Les diamants polycristallins.....	38
Figure II .23	Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant.....	38

CHAPITRE III

Figure III.1	Joint torique installé dans un vérin hydraulique.....	39
Figure III.2	Les quatre surfaces associées à l'évaluation d'un état de surface.....	44
Figure III.3	Profil de surface.....	41
Figure III.4	Les quatre ordres de défauts de surface.....	41
Figure III.5.A	Longueur d'évaluation et de base.....	42
Figure III.5.B	Ligne d'enveloppe supérieure.....	42
Figure III.5.C	Ligne moyenne.....	43
Figure III.6.A	Mesure des défauts d'ondulation.....	43
Figure III.6.B	Mesure des défauts de rugosité.....	44
Figure III.6.C	Mesure des défauts de rugosité Ra.....	45
Figure III.7.a	Signe radical d'état de surface avec ses cinq localisations d'information.....	46
Figure III.7.b	Exemple de spécification complète d'état de surface.....	46
Figure III.8	Six symboles de direction et de type des stries d'usinage.....	47
Figure III.9	Plaquette d'échantillons Viso-tactiles.....	49
Figure III.10	Principe de mesure d'un appareil à palpeur.....	49
Figure III.11	Appareil électronique de mesure a palpeur et patin.....	50
Figure III.12	Appareil électronique de mesure a palpeur.....	50
Figure III.13	Sortie numérique et graphique d'une mesure d'état de surface.....	51
Figure III.14	microscope à éclairage oblique.....	52
Figure III.15	image obtenue avec un microscope interférentiel.....	52

CHAPITRE IV

Figure IV.1	Topographie de surface obtenue en tournage et son profil théorique associé.....	55
Figure IV.2	Influence de l'arête secondaire sur le profil de rugosité.....	56
Figure IV.3	Influence de l'écroissage préalable du matériau brut sur son état de surface après usinage.....	58
Figure IV.4	Evolution de la rugosité totale en fonction de l'avance en chariotage.....	59
Figure IV.5	Evolution de la rugosité totale en fonction de la vitesse de coupe en chariotage.....	60
Figure IV.6	Evolution de la rugosité totale en fonction de la profondeur de passe en chariotage.....	61
Figure IV.7	Evolution de la rugosité totale en fonction du rayon de bec en chariotage.....	62
Figure IV.8	Illustration de l'écart entre le profil réel et le profil enveloppe dû à des phénomènes d'arrachement.....	62
Figure IV.9	Evolution de la rugosité totale en fonction de la durée d'usinage en chariotage.....	63
Figure IV.10	Influence de la face en dépouille sur la rugosité de la surface tournée à différent régimes de coupe.....	64
Figure IV.11	Représentation spatiale de la fonction $R_{\max}=f(h_a, v, f)$	64
Figure IV.12	Influence des fluides de coupe sur les états de surface en chariotage.....	65
Figure IV.13	Influence de la rigidité de la machine sur la rugosité de la surface usinée	67

CHAPITRE V

Figure V.1	machine d'essai.....	69
Figure V.2.a	plaquette utilisée.....	70
Figure V.2.b	bride-vice de fixation.....	70
Figure V.2.c	plaquette montée sur porte outil utilisé.....	70
Figure V.3	pied à coulisse utilisé.....	71
Figure V.4.1	rugosimètre SJ201.....	71
Figure V.4.2	Etalonnage automatique.....	71
Figure V.5	Préparation des éprouvettes d'essais.....	72
Figure V.6	outil à gorger.....	72
Figure V.7	outil à charioter utilisé pour l'ébauche.....	73
Figure V.8	éprouvettes d'essais.....	75
Figure V.9	représentation graphique de $Rz=f(Vc)$ et $Ra=f(Vc)$ pour l'aluminium..	76
Figure V.10	éprouvettes d'essais.....	77
Figure V.11	représentation graphique de $Rz=f(fc)$ et $Ra=f(fc)$ pour l'aluminium...	78
Figure V.12	éprouvettes d'essais.....	79
Figure V.13	représentation graphique de $Rz=f(Pc)$ et $Ra=f(Pc)$ pour l'aluminium...	80
Figure V.14	éprouvettes d'essais.....	81
Figure V.15	représentation graphique de $Rz=f(Vc)$ et $Ra=f(Vc)$ pour l'acier.....	82
Figure V.16	éprouvettes d'essais.....	83
Figure V.17	représentation graphique de $Rz=f(fc)$ et $Ra=f(fc)$ pour l'acier.....	84
Figure V.18	éprouvettes d'essai.....	85
Figure IV.19	Représentation graphique de $Rz=f(Pc)$ et $Ra=f(Pc)$ pour l'acier.....	86
Figure V.20	Influence de la dureté du matériau usiné sur la rugosité.....	88

Liste des tableaux

Tableaux	pages
Tableau III.1	symbole de base.....	46
Tableau III.2	symbolisation des différents procédés d'usinage.....	48
Tableau III.3	les valeurs de Ra selon les classes de la plaquette d'échantillons...	49
Tableau III.4	procédés de fabrication et états de surface.....	53
Tableau III.5	Le classement des défauts par numéro d'ordre et des méthodes d'exploration.....	54
Tableau IV.1	Exemples de liquides de coupe et leurs coefficients correcteurs....	65
Tableau IV.2	Les valeurs prises pour l'expérimentation.....	66
Tableau V.1	plan des expériences.....	73
Tableau V.2	variation des paramètres.....	74
Tableau V.3	résultats des mesures de la rugosité des éprouvettes d'aluminium pour variation de Vc.....	75
Tableau V.4	résultats des mesures de la rugosité des éprouvettes d'aluminium pour variation de fc.....	77
Tableau V.5	résultats des mesures de la rugosité des éprouvettes d'aluminium pour variation de Pc.....	79
Tableau V.6	résultats des mesures de la rugosité des éprouvettes d'acier pour la variation de Vc.....	81
Tableau V.7	résultats des mesures de la rugosité des éprouvettes d'acier pour la variation de fc.....	84
Tableau V.8	résultats des mesures de la rugosité des éprouvettes d'acier pour la variation de Pc.....	86

A pair of traditional Chinese calligraphy brushes with black handles and white bristles, resting on a white inkstone. The brushes are positioned vertically on the right side of the page. The background is a light-colored, textured surface with faint, stylized bamboo or reed patterns.

Introduction générale



Introduction générale :

L'objectif des travaux de recherche en fabrication mécanique a toujours été de trouver des solutions pour améliorer la productivité et la qualité des pièces usinées : faire le plus de pièces possible, le plus rapidement possible, en réduisant au mieux les coûts et les défauts de production. Le but d'une opération d'usinage est d'enlever la matière sous forme des copeaux pour produire les pièces désirées.

Les procédés d'usinage par enlèvement de matière sont nombreux, comme le fraisage, le perçage, ou le tournage. L'opération de tournage permet d'usiner des pièces cylindriques, cubiques ou excentrées en fonction de la cinématique de la machine (troisième axe etc.).

L'opération de fraisage (coupe discontinue) est utilisée pour usiner des pièces dont les formes ne sont pas de révolution. Nos travaux ont pour but de déterminer l'influence des différents paramètres de coupe sur la précision d'état de surface de pièces obtenus par usinage sur tour.

L'étude présentée traite donc du cas du tournage, en coupe continue, afin de cerner l'influence des paramètres dans un contexte plus simple que celui du fraisage, où la coupe est discontinue.

L'interface outil/copeau est un lieu d'interactions complexes entre phénomènes mécaniques, thermiques, et physico-chimique. La surface de l'outil en contact avec le copeau subit diverses formes d'usures qui sont les résultats de mécanismes tels que l'adhésion, l'abrasion, et la diffusion. La qualité des pièces produites dépend largement des conditions de coupe, et cette qualité est un paramètre important lors de la production des pièces mécaniques.

Le fluide de coupe aussi est un paramètre important puisqu'il permet de limiter l'élévation de la température dans les zones de coupe et d'établir la présence d'un film fluide entre les différentes surfaces. Cependant, dans le souci de protection de l'environnement et de la santé des personnels, la tendance actuelle est de limiter et même de supprimer l'utilisation des fluides de coupe.

CHAPITRE I

PROCEDE DE MISE EN FORME PAR ENLEVEMENT DE MATIERE



1- INTRODUCTION :

Dans un atelier de production, deux principaux types d'activités peuvent être distinguées, à savoir:

- Les activités d'assemblage des pièces composantes des produits manufacturés existants sur marché
- Les activités de mise en forme de la matière qui consistent à obtenir des pièces par façonnage par:
 - ✓ Mise en forme par enlèvement de matière : c'est le domaine de l'usinage dont les moyens sont sans cesse perfectionnés pour diminuer le coût des fabrications et améliorer la qualité du travail réalisé.
 - ✓ Mise en forme sans enlèvement de matière : c'est le domaine du formage à chaud ou à froid, de la fonderie, du frittage, etc.

Les deux solutions de mise en forme se complètent : très souvent l'usinage permet de parachever une pièce brute par fonderie ou formage, le diagramme sujet de la (Figure I.1) résume les différents procédés de mise en forme d'une pièce mécanique en fonction de l'état de la matière.

Etat de la matière

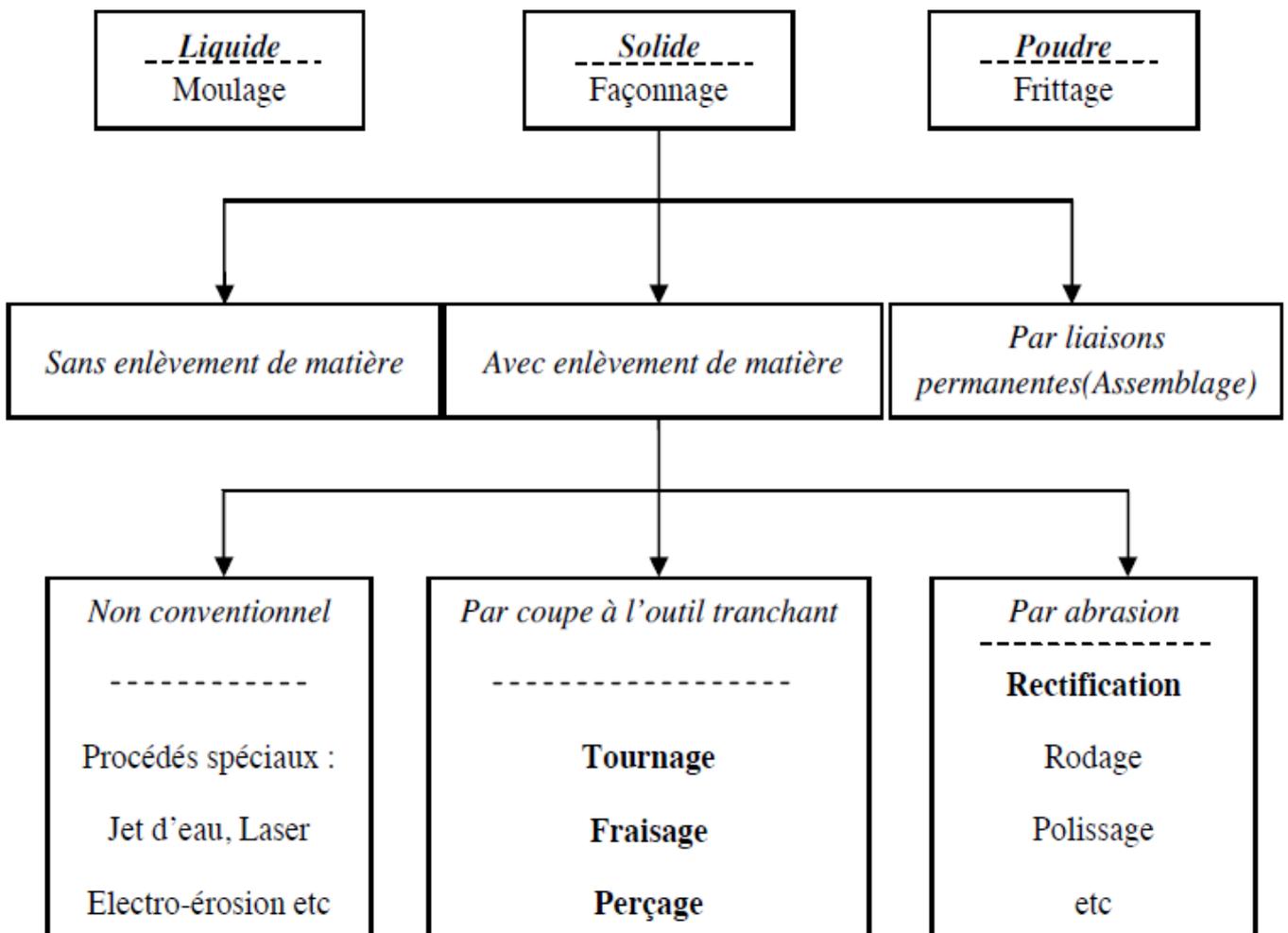


Figure I.1 : les différents procédés de mise en forme d'une pièce en fonction de l'état de la matière.

2- Principe d'usinage :

La mise en forme d'une pièce mécanique met en œuvre un ensemble de procédé(s), à savoir : le tournage, le fraisage, le perçage ou/et les procédés d'usinage par abrasion (tel que la rectification, le rodage, le polissage, la super finition etc.).

2.1- Définition :

L'usinage est une opération consistant à soumettre une pièce à l'action d'une ou de plusieurs machines-outils essentiellement dans le cas où cette action consiste à un enlèvement de matière. Le terme usinage, synonyme du mot enlèvement de matière ou enlèvement de copeaux, désigne tous les moyens mis en œuvre pour obtenir une pièce ayant des côtes et des tolérances fixées à l'avance, à partir d'une pièce brute venue de la forge ou de fonderie.

2.2- Objectif d'usinage :

L'usinage consiste à réduire progressivement les dimensions de la pièce par enlèvement de matière à froid et sans déformation plastique. La quantité de matière enlevée est dite copeaux et le dispositif avec lequel est enlevée la matière est appelé outil de coupe. L'opérateur utilise des machines-outils pour assurer l'usinage d'une pièce, (voire la Figure I.2)

D'où les éléments intervenant dans l'action d'usinage sont essentiellement

- la pièce à usiner,
- un appareillage destiné à supporter la pièce nommée porte pièce,
- un outil destiné à produire le copeau,
- un appareillage destiné à supporter l'outil nommé porte outil
- une machine-outil qui assure les différents mouvements nécessaires à l'usinage.

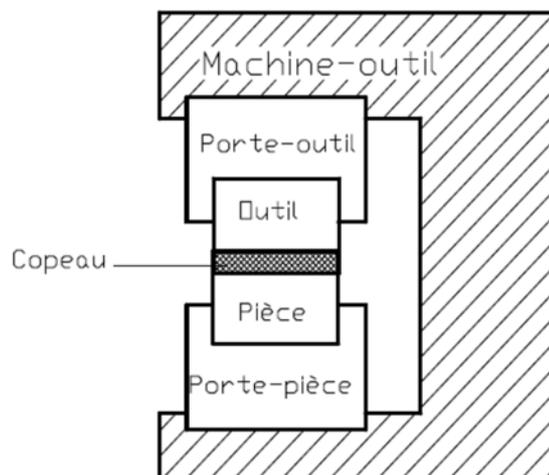


Figure I.2 : schéma de procédés d'usinage d'une pièce

Le schéma de la Figure I.2 est général (applicable) pour tous les procédés d'usinage déjà décrits, à savoir:

- le tournage
- le fraisage
- le perçage
- les procédés d'usinage par abrasion.

Les machines employées dans les ateliers d'usinage comprennent :

- les tours établis avec un encombrement et des configurations variables selon les formes, les grandeurs et les cadences de production des pièces qu'ils en sont destinés à produire,
- les fraiseuses qui offrent plus de flexibilité par rapports aux tours en termes de création des formes plus complexes sur les pièces à usiner,
- les perceuses employées pour générer les emplacements des vis ou des rivets dans les pièces,
- les aléseuses destinées à l'alésage des cylindres des machines à vapeur, des corps de pompes, etc.
- les rectifieuses qui favorisent l'obtention d'un état de surface beaucoup meilleure que les machines déjà décrites (tours, fraiseuses, perceuses et aléseuses),
- les raboteuses assurant le dressage des pièces telles que les bâtis des machines, les plaques de fondation, etc.

Quel que soit la machine adoptée pour l'usinage, la procédure de travail est la même. Cette dernière ne dépend que de la fonctionnalité de la pièce dans le mécanisme où elle en doit être montée. En effet:

- Si cette dernière est une pièce de rechange (pièce unitaire) et le service de maintenance doit usiner une similaire pour faire fonctionner la machine défailante, la procédure sujet de la Figure I.3 doit être applicable,
- Si le client communique à la société une série de pièces à usiner, la procédure sujette de la Figure I.4 sera la plus adéquate à être suivie.

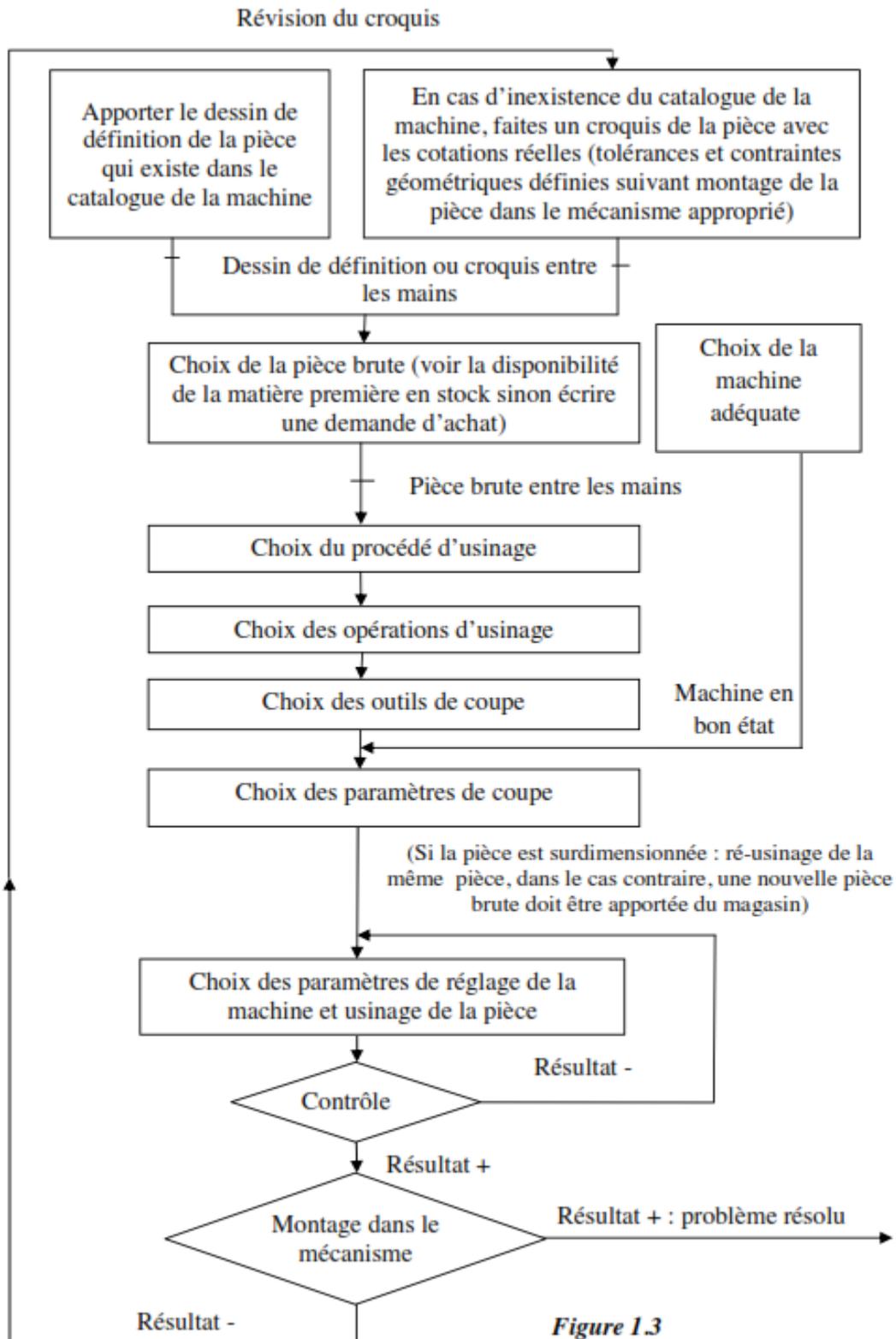


Figure I.3 : la procédure de travail d'une seule pièce.

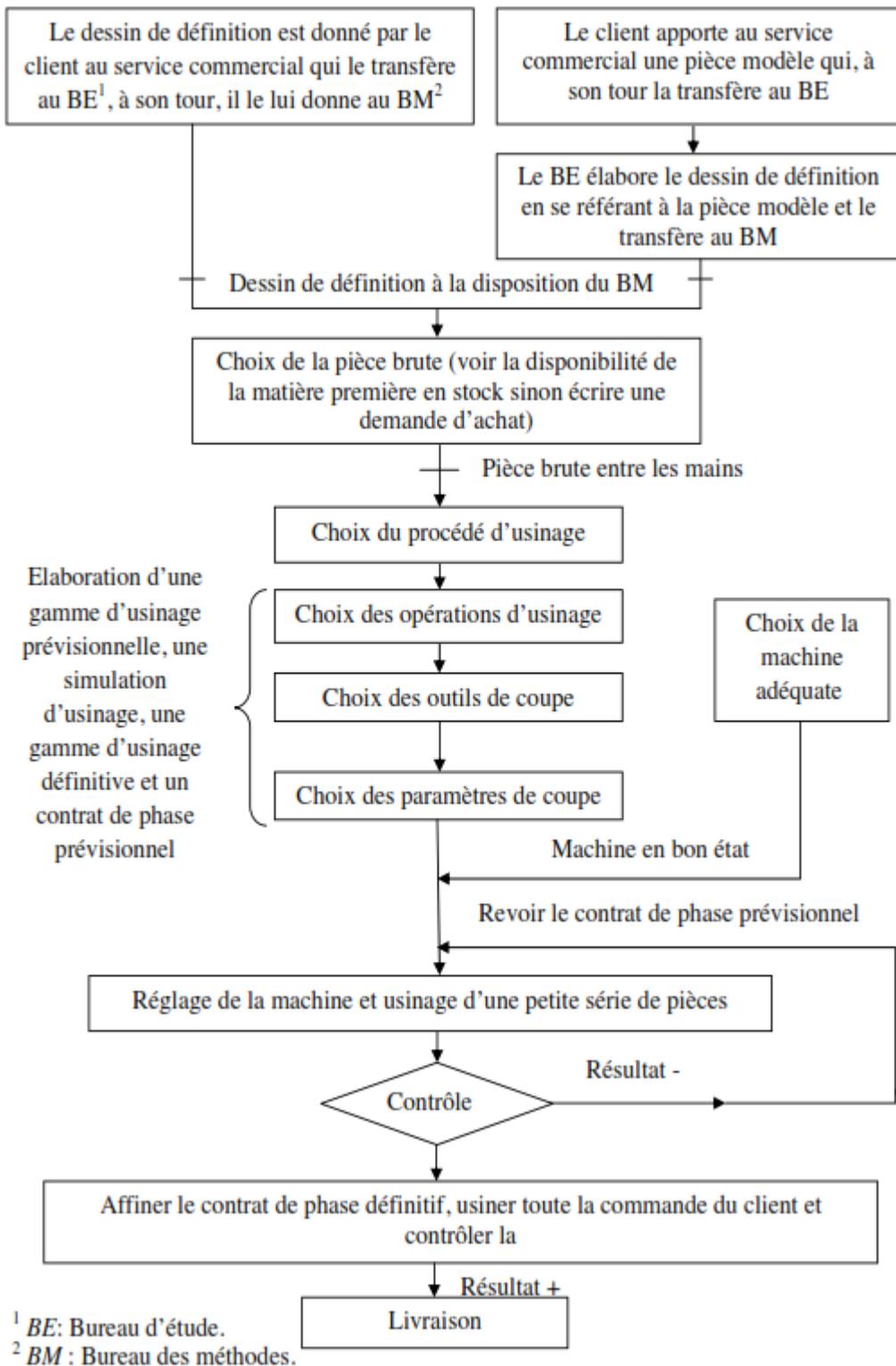


Figure I.4 : la procédure de travail d'une série de pièce.

2.3-travail de forme et travail d'enveloppe

L'usinage consiste à enlever la matière de façon à donner à la pièce brute la forme voulue en produisant des surfaces planes, cylindriques, coniques et/ou spéciales. La génération de ces surfaces peut être obtenue:

➤ **par un travail de forme :**

Pour ce type de travail, l'outil épouse sa forme à la pièce. Il est nommé outil de forme : c'est la géométrie de son arête tranchante qui détermine le profil de la surface obtenue. La génératrice correspond à l'arête tranchante de l'outil (Figure I.5).

Exemples d'outils de forme : outil coudé à charioter dans le cas d'une opération de chanfreinage, foret, outil à saigner dans le cas de l'exécution d'une gorge, alésoir, fraise en queue d'aronde, taraud etc.

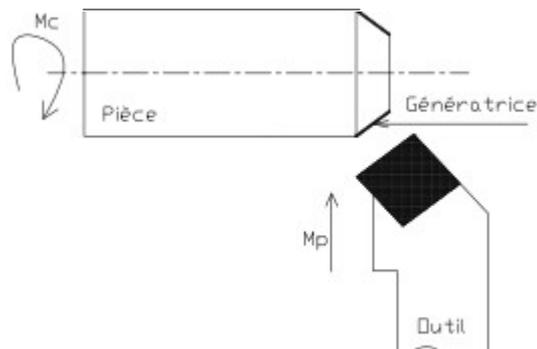


Figure I.5 : usinage par un travail de forme.

➤ **ou par un travail d'enveloppe :**

Au cours de ce travail, nommé encore travail par génération, la génératrice correspond à l'ensemble des positions successives du point générateur de l'outil et ce dernier est nommé outil d'enveloppe.

Exemples d'outils d'enveloppe: outil à aléser, outil à charioter couteau, outil à charioter coudé dans le cas d'une opération de chariotage, fraise à surfacer etc.

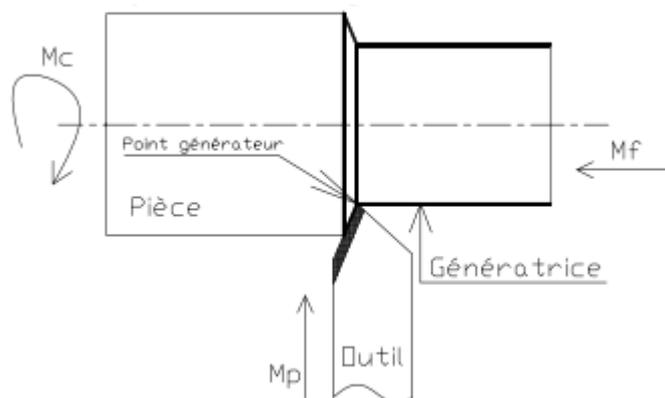


Figure I.6 : usinage par un travail d'enveloppe.

Remarque :

Tout dépend de l'opération d'usinage, certains outils de coupe sont parfois considérés comme outils de forme et parfois comme outils d'enveloppe.

3- les différentes procédés de mise en forme par enlèvements de matière :**A-par coupe à l'outil tranchant :****A.1-le fraisage :****A.1.1- définition :**

Le fraisage est un procédé de fabrication où l'enlèvement de matière sous forme de copeaux résulte de la combinaison de deux mouvements : la rotation de l'outil de coupe, d'une part, et l'avancée de la pièce à usiner d'autre part.

Le fraisage est habituellement réalisé par une machine-outil, la fraiseuse qui est particulièrement adaptée à l'usinage de pièces prismatiques et permet également, si la machine est équipée de commande numérique, de réaliser tout type de formes mêmes complexes. L'outil classiquement utilisé est la fraise.

La fraise, comporte plusieurs arêtes de coupe dont chacune enlève une certaine quantité de métal sous forme de copeaux.

Les avantages du fraisage sont un rendement élevé, un bon fini de surface et une haute précision, ainsi qu'une grande souplesse au niveau de la génération de différentes formes. Le plus souvent, le fraisage est utilisé pour produire des surfaces planes, des épaulements et des gorges, mais son efficacité en contournage va croissante grâce à l'utilisation des techniques CNC (Computerized Numerical Control)

A.1.2-Les principes généraux de fraisage :

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

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

Sur toutes les fraiseuses, la production de ces différentes surfaces est réalisée grâce à :

- rotation de la fraise

-avance de la pièce

Ces différentes possibilités font apparaître 2 grands principes de fraisage :

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

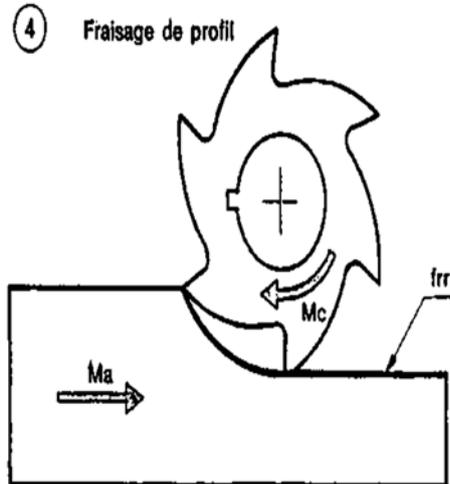


Figure I.7.a : fraisage de profil.

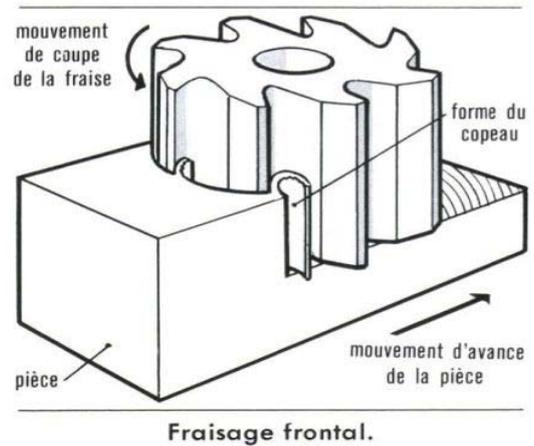


Figure I.7.b : fraisage frontal.

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

Le choix du mode de fraisage dépend de :

- l'état de surface exigé
- la spécification géométrique

A.2-le tournage :

A.2.1-définition :

Le tournage est un procédé d'usinage par enlèvement de matière qui consiste en l'obtention de pièces de forme cylindrique ou/et conique à l'aide d'outils coupants sur des machines appelées tour.

Le tour c'est une machine d'outillage conçue pour le travail unitaire et la petite série. Il permet la réalisation de différents surfaces nécessitant toujours une rotation de la pièce autour de d'un axe de révolution.

A.2.2-principe de tournage :

Le tournage, comme son nom l'indique, concerne un mouvement de rotation. La technique du tournage consiste donc à faire tourner la pièce à usiner autour d'un axe défini. Cet axe est celui de la

broche du tour. La pièce à usiner est solidaire de cette broche, le moyen de préhension peut être un mandrin ou tout autre principe de serrage. La machine utilisée est nommée "tour".

Le but du tournage est de réaliser des formes de révolution tels que cylindres, cônes, tores et autres formes de révolution complexes.

Le tournage est une discipline un peu particulière dans le domaine de l'usinage car c'est la seule pour laquelle on a à la fois :

- une pièce mobile
- un outil à dent unique
- une coupe continue (la matière défile en continu sur la face de coupe de l'outil)

Ces spécificités en font une discipline un peu plus difficile que les autres lorsqu'on s'intéresse à la durée de vie des outils.

Le principe du tournage est le suivant : la pièce est solidaire d'une broche tournante (donc elle tourne) et l'outil se déplace dans un plan. La trajectoire de l'outil dans son plan d'évolution donne la génératrice de la pièce de révolution.

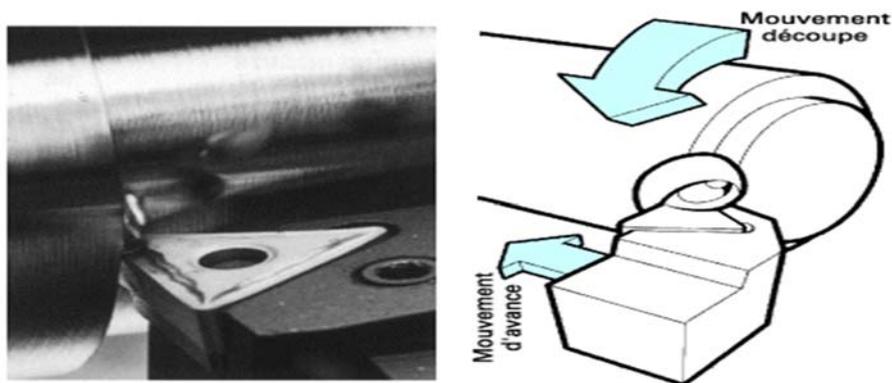


Figure I.8 : usinage en tournage.

A.3-perçage :

A.3.1-définition :

Le perçage est un usinage consistant à exécuter des surfaces cylindriques intérieures (trous) dans une pièce, Ce trou peut traverser la pièce de part en part ou bien ne pas déboucher. On parle alors de trou borgne.

Ce trou peut être effectué à l'aide d'outils rotatifs. L'outil de coupe, appelé foret.

Le foret, est animé d'un mouvement de rotation continu et d'un mouvement de déplacement longitudinal. C'est une opération par enlèvement de matière.

Ce trou peut servir à faire passer une pièce (un arbre, un tube), un fluide, ou peut encore être taraudé pour recevoir une vis

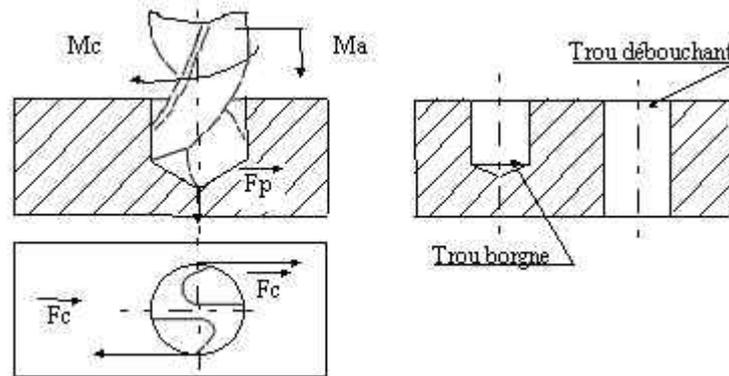


Figure I.9 : perçage.

A.3.2-principe perçage :

L'opération de perçage nécessite deux mouvements simultanés :

- Le mouvement de coupe M_c : donné par la rotation de la broche.
- Le mouvement d'avance M_a : donné par la translation de Foureau

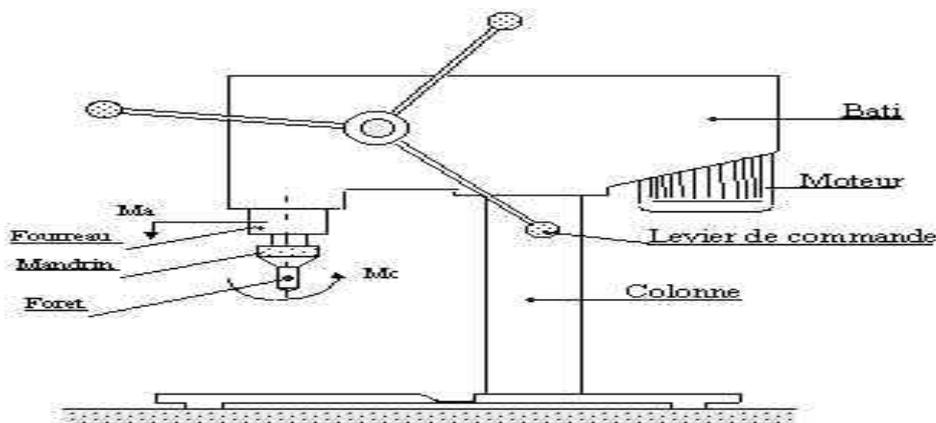


Figure I.10 : principe de perçage.

B-par abrasion :

B.1-définition :

L'usinage par abrasion est un usinage par enlèvement de matériau sous forme de copeaux minuscules arrachés par les arêtes vives d'un grand nombre de grains abrasifs. L'usinage par abrasion est une technique très ancienne, qui a précédé l'usinage par outils de coupe. Bien que le travail par abrasion conduise en général à des débits de matière plus faibles que l'usinage par outil de coupe, cette technique

s'impose dans plusieurs cas et, en particulier, pour l'usinage des matériaux durs tels que les aciers traités, les céramiques, les verres ; pour l'affûtage des outils ; pour le travail de finition, en vue de réaliser une bonne qualité de surface et une bonne précision géométrique et dimensionnelle ; pour le travail d'ébauche, dans certains cas particuliers : ébarbage des lingots et pièces de fonderie.

Les abrasifs peuvent être utilisés libres, en suspension dans un fluide — liquide ou gaz —, incrustés dans un support, ou encore agglomérés dans un liant sous forme de meules ou de pierres. Les procédés d'usinage par abrasion diffèrent par le mode d'application de l'abrasif et le mouvement relatif pièce-abrasif. Les procédés les plus courants sont la rectification, le pierrage, la super finition, le rodage et le polissage.

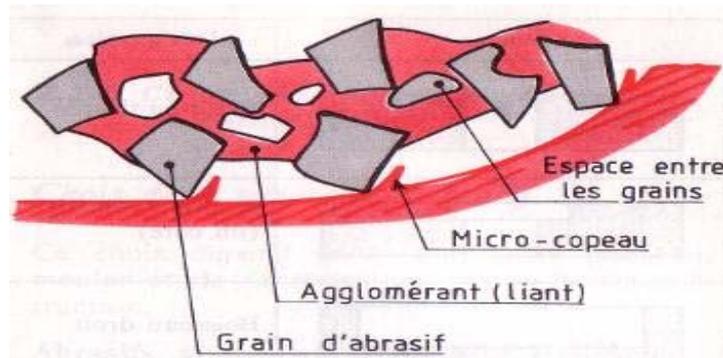


Figure I.11 : usinage par abrasion.

B.2-principe d'usinage :

Basées sur l'utilisation de grains d'abrasifs libres ou liés entre eux (meules) ou à un support (bandes, papier...), les opérations d'usinage par abrasion (abrasive machining) sont extrêmement variées : elles vont des opérations d'écrouissage à la meule des brames ou blooms d'acier élaborés par coulée continue à la réalisation par polissage des circuits micro-électroniques ou des pièces d'optique de haute résolution, en passant par la fabrication ou la finition par rectification des pièces mécaniques de toutes sortes (outils de mise en forme par déformation plastique des métaux ou par injection des polymères, pièces de roulements, éléments de machines...), le ponçage du bois, le polissage du marbre et du granit... Ainsi, Certains auteurs estiment que le coût des seules opérations de rectification représente 20 à 25 % du coût des opérations d'usinage dans un pays industrialisé. Par ailleurs, le travail par abrasion est la seule possibilité économique pour :

- usiner les matériaux de très hautes dureté et/ou de haute fragilité : aciers à roulement martensitiques, aciers rapides dans l'état métallurgique d'utilisation, alliages réfractaires, carbures métalliques, verres, céramiques ;
- réaliser les très faibles rugosités (de l'ordre du nm) indispensables à certaines applications optiques, microélectroniques, micromécaniques...

Il faut noter enfin que les interactions entre les grains abrasifs et la pièce usinée sont très proches des interactions entre pièces frottantes qui conduisent à leur usure par abrasion, un des modes d'usure les plus importants des outils de mise en forme (cylindres de laminage, matrices de forgeage, filières de filage et tréfilage...), des éléments de machines ou des produits manufacturés. Les performances des procédés d'usinage par abrasion ne cessent de s'améliorer du fait des besoins industriels croissants. Toutefois, malgré leur grande importance économique, les procédés d'usinage à l'abrasif restent largement méconnus et leurs aspects scientifiques mal compris et mystérieux.

Cet article, consacré aux aspects mécaniques de l'abrasion, a pour objectif de commencer un bilan des connaissances scientifiques sur ce type d'usinage ; le lecteur pourra également se reporter aux articles spécialisés de la présente rubrique pour une description plus précise des modalités de mise en œuvre des divers procédés.

B.3-rectification :

B.3.1-définition :

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 la rectification cylindrique.

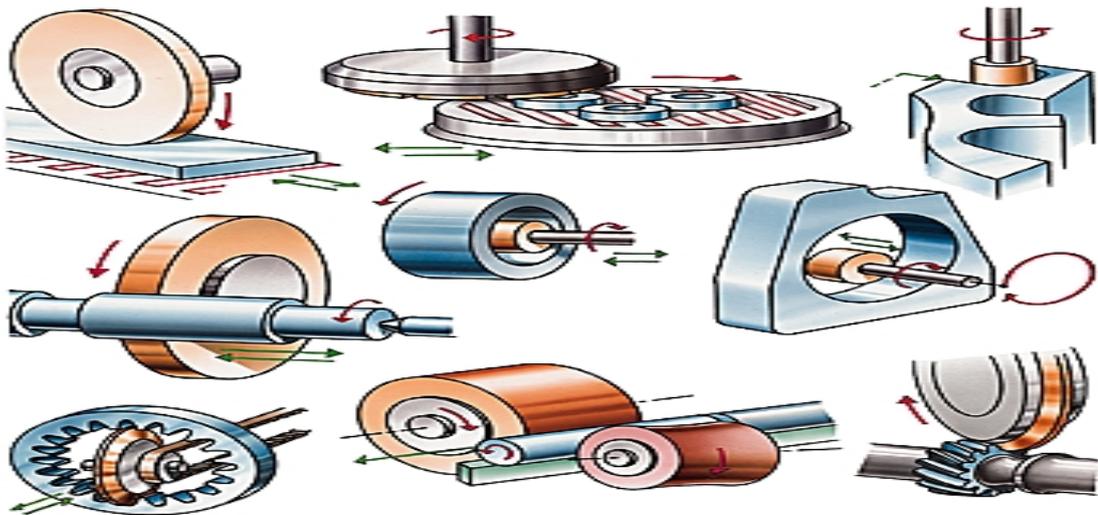


Figure I.12 : la rectification des différentes pièces.

B.3.2-Principe :

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

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

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

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

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

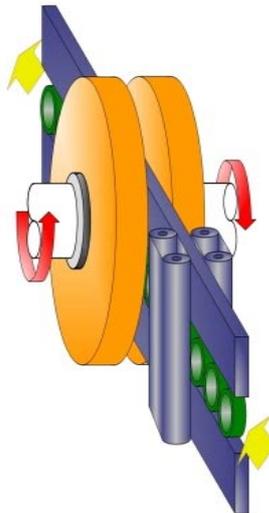
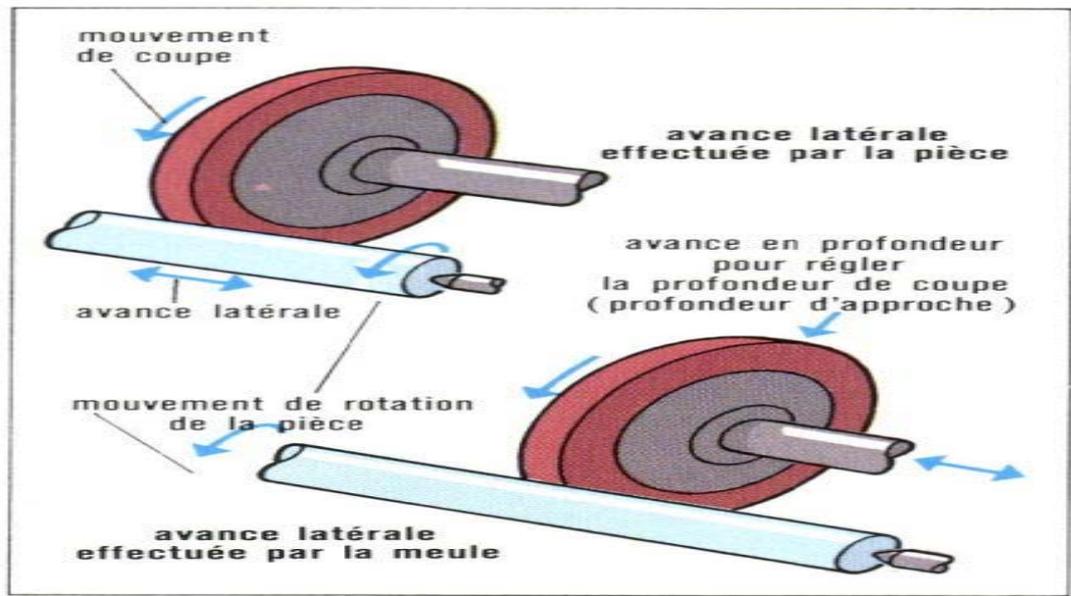


Figure I.13 : Rectification Double face



Mouvements en rectification cylindrique.

Figure I.14 : rectification cylindrique.

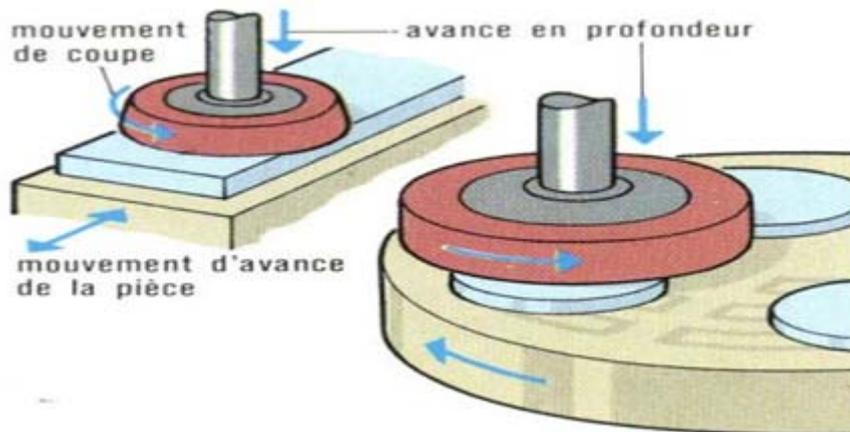


Figure I.15 : Rectification plane frontale.

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 pour arroser la meule et les pièces afin ne pas faire des brulures sur les pièces produites et d'éviter un mauvais état de surface.

B.4-Le rodage :

B.3.1-Définition :

Le **rodage** est une technique ancienne qui permet d'ajuster parfaitement deux surfaces pour qu'elles deviennent étanches, La technique consistait en un frottement rotatif des deux pièces avec une pâte d'émeri jusqu'à ce que le contact soit parfait.

Le rodage est une opération de finition (usinage) qui permet d'obtenir une surface de rugosité $Ra=0,1 \mu m$. C'est un procédé par abrasion.

Le rodage intérieur cylindrique est le plus connu car utilisé dans le secteur automobile pour les chemises de cylindre, les injecteurs Diesel...

B.4.2-Principe de rodage :

La pierre abrasive de rodage est formée de plusieurs couches de grains qui se régénèrent régulièrement (Fig. I.16.a). Les grains abrasifs se déchaussent du liant lorsque le pouvoir tranchant des arêtes est émoussé (Fig. I.16.b). Cette action expose des nouveaux grains abrasifs coupants au contact de la matière à usiner.

Le procédé de rodage est capable de produire des alésages optimums dans des temps très courts.

Ce processeur est particulièrement économique et est une alternative compétitive aux opérations de :

- Rectification intérieure
- Tournage dur de précision
- Alésoir
- Galetage



Figure I.16.a : La pierre abrasive

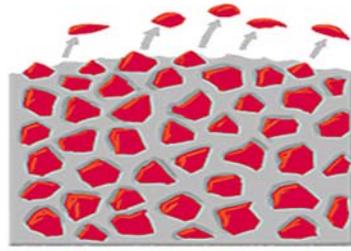


Figure I.16.b : Les grains abrasifs

B.5-Polissage :

B.5.1-Définition :

Le polissage ou poli est l'action de polir, de rendre lisse et éventuellement brillant par :

- abrasion: polissage manuel ou en machines (tribofinition, polisseuse automatiques) avec des vibrateurs ou des centrifugeuses satellitaires - avec des disques de différents matériaux tournant à grande vitesse, avec ou sans pâte à polir, ou par les techniques de tribofinition (création de mouvements relatifs entre pièces à polir et médias ou abrasifs en présence d'additifs).
- écrouissage : Utilisation d'un brunissoir, polissage par vibration avec médias brunissants (billes et aiguilles d'acier).

B.5.2-Principe de polissage :

Le polissage peut être réalisé de 2 façons : manuellement ou mécaniquement, avec de nombreuses techniques différentes.

B.5.2.1-Polissage manuel :

Le polissage est l'action de polir, de rendre lisse et de brillanter par abrasion. La pièce est présentée manuellement sur la surface de meules ou de disques tournant à grande vitesse et enduits ou non de pâte à polir.



Figure I.17 : polissage manuel.

B.5.2.2-Polissage en machine :

Le principe est le même que pour le polissage manuel, mais réalisé grâce à une machine.

C- non conventionnels

C.1-Définition :

On parlera d'usinages non conventionnels en référence à des usinages ne faisant pas appel à la « coupe des métaux ».

Exemple :

C.2-Jet d'eau :

Le **découpage au jet d'eau** est un procédé de fabrication qui utilise un jet d'eau hyperbare pour découper la matière (exemples : mousse, cuir, matériaux métalliques, matériaux composites, produits agroalimentaires, etc.).

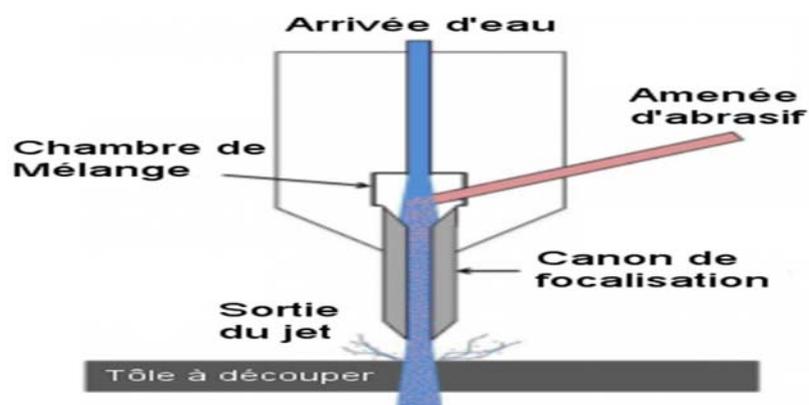


Figure I.18 : usinage avec un jet d'eau.

C.3-Laser :

Le **découpage laser** est un procédé de fabrication qui consiste à découper la matière grâce à une grande quantité d'énergie générée par un laser et concentrée sur une très faible surface.

Le laser peut être pulsé (source de type YAG), continu (source CO₂) ou azote. Actuellement, les lasers à source CO₂ sont largement majoritaires. Ils permettent en effet de découper beaucoup plus de matériaux et à une vitesse plus élevée que les lasers pulsés

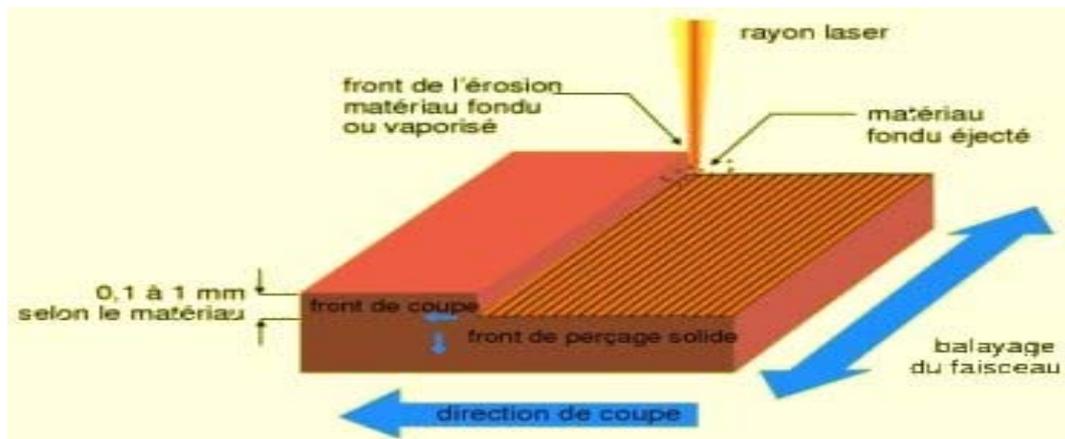


Figure I.19 : le découpage laser.

CHAPITRE II

LE TOURNAGE



1. Historique

2000 ans avant Jésus Christ, la plus ancienne machine-outil jamais découverte est un tour. A l'âge du bronze, les artisans se servaient de tours à arc. Plus tard, le tour de potier sera découvert.

Vers l'an 1500, Léonard de Vinci propose des solutions basées sur du tournage à mouvement continu. Son tour, comme beaucoup de ses inventions, est en avance sur son époque.

Il faudra attendre le XIX^{ème} siècle pour que les bases de la mécanique moderne poursuivent cette évolution et débouchent sur le tour automatique.

Historiquement les premières machines ont donc été des tours pour la fabrication de pièces de révolution. Les tours actuels sont toujours basés sur le même principe. Par contre, parmi les autres machines, certaines ont évolué et d'autres ont disparu. Par exemple, les machines à raboter et les limeuses (rebaptisées ultérieurement étaux limeurs) ont quitté les ateliers, remplacées par les fraiseuses. A la fin des années 70, l'apparition des premières commandes numériques a révolutionné le monde de la machine-outil. Les types de machines (tours - fraiseuses) n'ont pas fondamentalement changé, mais les temps de reconfiguration de ces machines ont été considérablement réduits par le remplacement des butées réglables (mécaniques ou électromécaniques) par des butées logicielles. L'utilisation des commandes numériques a également permis d'augmenter la complexité des formes réalisées grâce à la combinaison de mouvements suivant plusieurs axes.

Les machines sont classées en deux catégories :

Fraisage : L'outil tourne, la pièce se déplace par rapport à l'outil. Cela permet de réaliser des formes planes, des moules...

Tournage : La pièce tourne, l'outil se déplace par rapport à la pièce : pour réaliser des pièces de révolution.

Bien entendu, des industriels fabriquent des tours, où les outils peuvent tourner, ou des centres de fraisage où les pièces peuvent être entraînées en rotation... ce sont des machines hybrides, mixtes, ou machine multiaxe.

2. Les types de tour utilisés dans l'industrie

Les tours les plus utilisés dans l'industrie sont :

- ✓ Les tours parallèles
- ✓ Les tours revolver
- ✓ Les tours en l'air
- ✓ Les tours verticaux
- ✓ Les tours multibroches.

Ces tours peuvent être automatiques, semi-automatiques, ou à commande numérique avec calculateur. Ils se distinguent les uns des autres par leur forme, leurs dimensions, la précision d'usinage et la Puissance, ...etc.

3. Le Principe du tournage

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé, L'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce.

Dans ce chapitre, nous allons définir certaines notions de base concernant l'outil, la pièce et la machine-outil.

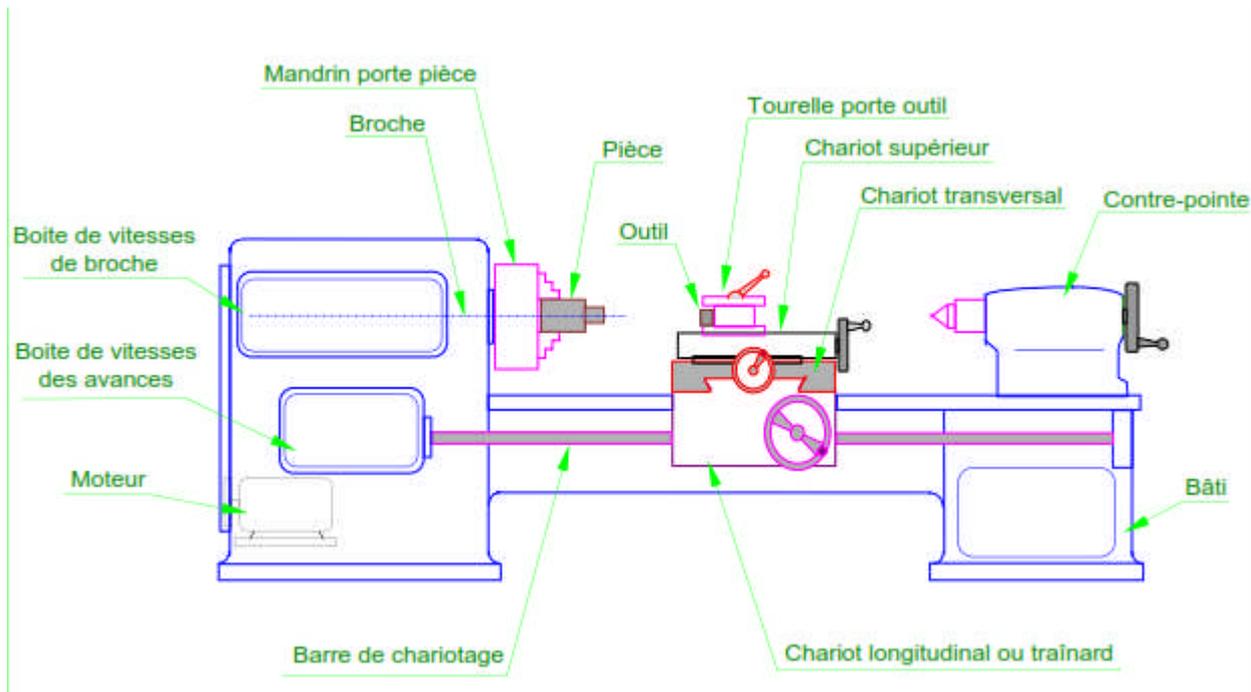


Figure II.1: Tour à charioter et à fileter.

4. Les opérations de base en tournage

En tournage extérieur, on peut souvent dissocier les pièces complexes en profils de coupe élémentaires pour le choix des outils et des paramètres de coupe.

Pour faciliter le choix du type d'outil, on peut considérer qu'il existe, en tournage, quatre opérations de base (figure II. 2):

- ✓ Tournage longitudinal, ou chariotage (figure II. 2.1)
- ✓ Dressage (figure II. 2.2)
- ✓ Tournage de cônes (figure II. 2.3)
- ✓ Contournage (figure II. 2.4)

a) **En chariotage**, le mouvement d'avance (mouvement de l'outil) est une translation rectiligne parallèle à l'axe de révolution de la pièce, et cet usinage aura pour effet de réduire le diamètre de la pièce.

b) **En dressage**, le mouvement d'avance est une translation rectiligne de l'outil perpendiculaire à l'axe, ce qui diminue la longueur de la pièce et génère un plan orthogonal à n'axe.

- c) **En combinant les deux types de déplacements** précédents (avance de l'outil en translation rectiligne oblique/axe), on génère des cônes de révolution.
- d) **Enfin**, en donnant à l'outil une trajectoire plane quelconque (profil de **contournage**), on peut obtenir une forme de révolution quelconque. Les tours à commandes numériques de contournage permettent de suivre de tels profils, définis géométriquement par des combinaisons d'éléments simples (segments, cercles...) ou analytiquement par une fonction, ou encore point par point dans le cas de profils non définis mathématiquement.

Le profil ainsi défini numériquement remplace le concept de gabarit de copiage.

Sur un tour CNC, les cas précédents deviennent en fait des cas particuliers du contournage.

(Figure II.3.A)

Ses différentes opérations correspondent à un usinage dit « de génération » ou « d'enveloppe »: la forme obtenue, à l'échelle macro géométrique, ne doit rien à la forme de l'outil qui l'a générée (figure II.3.B). En d'autres termes, la forme obtenue dépend uniquement de la trajectoire de l'outil, à la rugosité près.

À l'opposé, les gorges, filetages, etc., sont obtenues par reproduction dans la pièce du profil de l'outil et sont qualifiées d'usinage « de forme » (figure II.3.C).

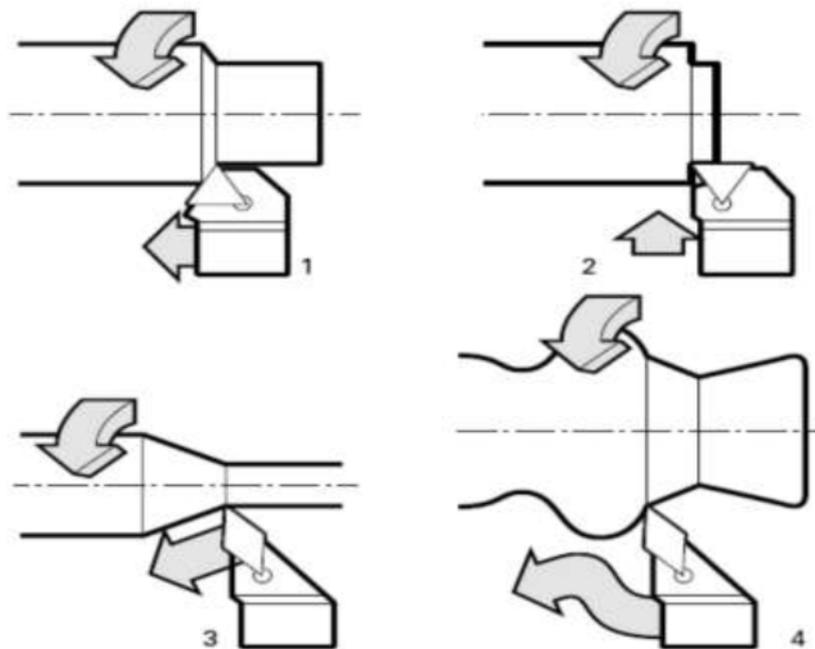


Figure I.2 : Opérations de base en tournage

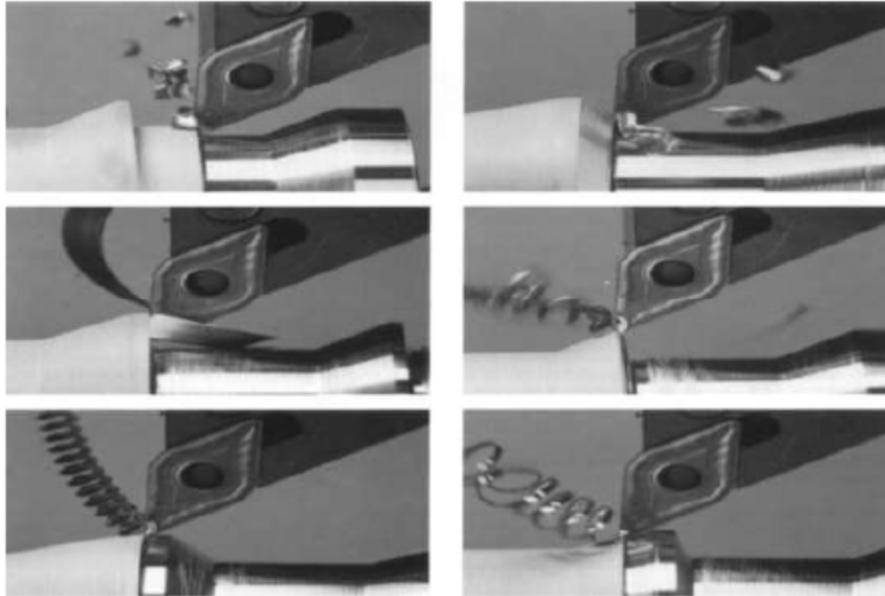


Figure II.3.A : Opérations de contournage

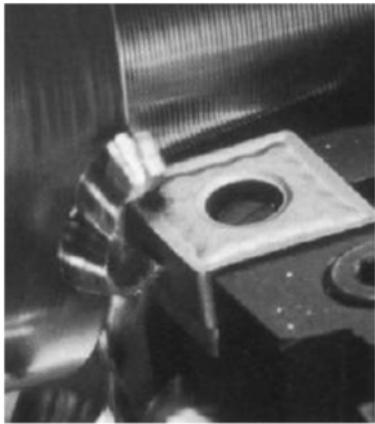


Figure II.3.B : travail d'enveloppe.



Figure II.3.C : travail de forme.

5. Principaux éléments d'une pièce en tournage

La figure II.4 illustre les principaux éléments d'une pièce à usiner et d'un outil. La surface de la pièce sujette à l'usinage est appelée surface de la pièce. Elle peut être brute (résultant de différents procédés comme moulage, forgeage, laminage, etc.) ou obtenue par usinage de l'une des opérations précédentes. La surface engendrée (ou surface usinée) est une surface désirée, générée par le processus d'enlèvement de matière (un outil de coupe au cours d'usinage). Les deux surfaces sont reliées par une surface engendrée intermédiaire (générée pendant l'usinage par une arête coupante) appelée « surface coupée ».

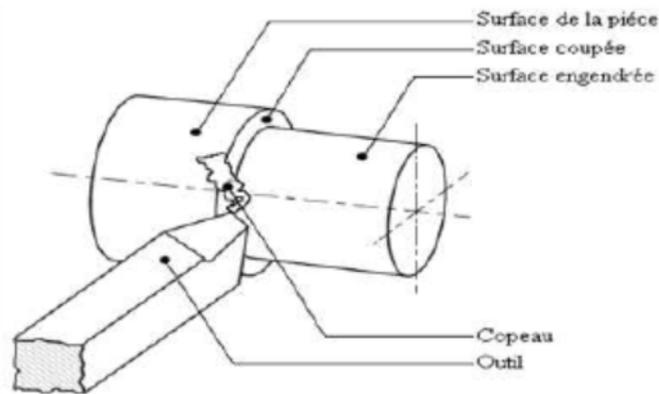


Figure II.4: Surfaces de la pièce.

6. Paramètres de coupe en 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 tel que le matériau usiné, le matériau et la géométrie de l'outil, les fluides de coupe, l'état de la machine-outil, etc.

a) Vitesse de coupe

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse rad/s (soit N tr/min), cette vitesse angulaire étant communiquée par la broche de la machine via le porte-pièce.

Compte tenu du diamètre de la pièce au point d'usinage situé sur un diamètre D , la vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil (supposé fixe par rapport à la machine) vaut :

$$V_c = (\text{m/min}) \quad (1.1)$$

Ou bien

$$V_c = (\text{m}) \times \omega \text{ (rad/s)} \quad (1.2)$$

Cette vitesse est appelée vitesse de coupe; avec les unités traditionnelles de la fabrication mécanique :

Il convient d'observer que la vitesse de coupe n'est constante que si la vitesse de broche et le diamètre de la pièce demeurent inchangés.

$$N \text{ (tr/min)} = (1.3)$$

En dressage, par exemple où l'outil se déplace en direction du centre, la vitesse de coupe varie continuellement si la rotation de la pièce s'effectue à une vitesse de broche constante.

Or, pour une productivité maximale et une meilleure qualité des surfaces obtenues, il est souhaitable de maintenir la vitesse de coupe constante.

Sur un grand nombre de tours modernes, la vitesse de broche augmente au fur et à mesure que l'outil approche de l'axe, afin de compenser ainsi la diminution de diamètre. Mais dans le cas de très petits diamètres, cette compensation se révèle impossible du fait de la plage de vitesse limitée

qu'autorisent les machines. De même, lorsqu'une pièce, comme cela est souvent le cas, présente des diamètres différents ou est de forme conique ou courbe, la fréquence de rotation doit être corrigée en fonction du diamètre, pour maintenir la vitesse de coupe constante

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

- ✓ Des matériaux de la pièce et de l'outil
- ✓ De la lubrification
- ✓ De la durée de vie souhaitée pour l'outil ; des valeurs des autres paramètres de coupe(avance, profondeur de passe...).

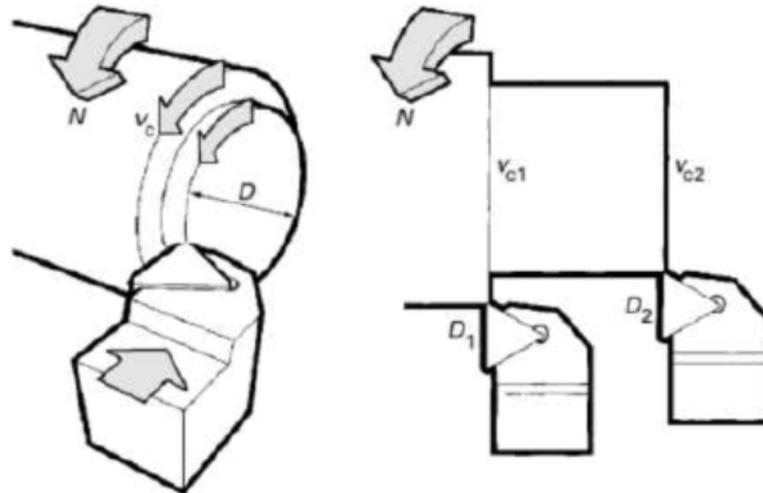


Figure II.5 : La définition des trois variables : N, Vc, D.

b) Vitesse d'avance Vf. Avance par tour f

La vitesse d'avance Vf (mm/min) est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti. L'avance f par tour (mm/tr) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée.

L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent. La vitesse d'avance Vf (mm/min) est égale à f (mm/tr) × N (tr/min).

$$Vf \text{ (mm/min)} = f \text{ (mm/tr)} \times N \text{ (tr/min)}. \quad (1.4)$$

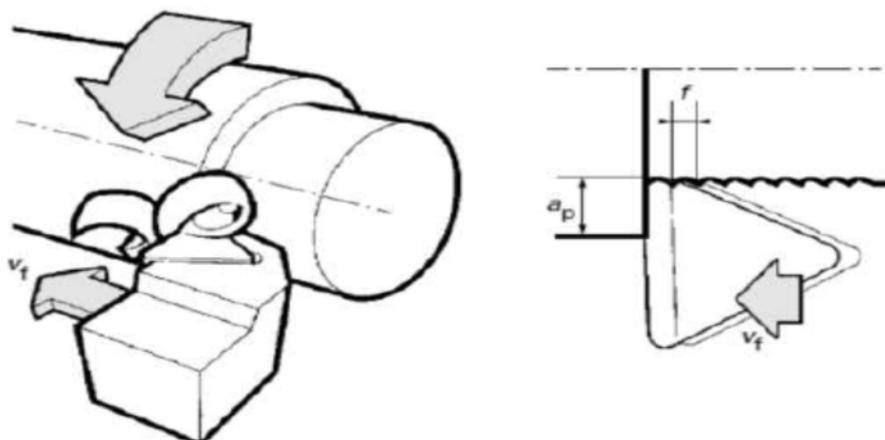


Figure II.6 : Vitesse d'avance Vf. Avance par tour f.

On distingue trois sortes d'avance

➤ **Avance longitudinale :**

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

➤ **Avance transversale :**

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

➤ **Avance oblique :**

On appelle avance oblique si l'outil se déplace sous un angle par rapport à l'axe de l'ébauche

L'avance peut être désignée par

- ❖ Avance par tour " f_{tr} ", [**mm/tr**], Millimètre par tour lors du tournage, fraisage,
- ❖ Avance par minute " f_{min} ". [**mm/min**], Millimètre par minute dans tous les cas d'usinage.

L'avance représente une donnée clé pour la qualité de la surface usinée, elle influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent.

c) 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.

Les paramètres d'usinage sont des grandeurs qui caractérisent les mouvements de l'outil et de la pièce à usiner ainsi que les valeurs de la surépaisseur d'usinage et de la section de coupe.

Pour enlever de la matière en cours d'usinage, deux mouvements sont nécessaires : mouvement de coupe et mouvement d'avance. D'une manière générale les mouvements de coupe peuvent être donnés soit par la pièce soit par l'outil.

d) Mouvement de coupe

Le mouvement de coupe est un mouvement relatif principal entre l'outil et la pièce. Il est caractérisé par la **vitesse de coupe** v_c qui est une vitesse instantanée du point considéré de l'arête par rapport à la pièce. Dans le cas du mouvement circulaire, la vitesse de coupe est une fonction de la **vitesse de rotation** n et du diamètre D de l'élément en rotation. Pour le tournage, il faut prendre le diamètre du cercle qui se trouve sur le point de l'arête de coupe le plus éloigné de l'axe de rotation.

Étant donné que la vitesse de coupe v_c est définie en m/min, le diamètre D en mm et la vitesse de rotation n en tr/min, le chiffre « 1000 » tient place de facteur de conversion d'unité.

e) Mouvement d'avance

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 ces composantes soit rectiligne. Le mouvement d'avance est caractérisé par la vitesse d'avance v_f qui est une vitesse instantanée du mouvement d'avance du point considéré de l'arête de coupe par rapport à la pièce.

Elle est exprimée soit en mm/min soit en mm/tour. Si l'avance est discontinue, par exemple dans le cas du rabotage, la vitesse d'avance n'est pas définie.

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 (ϕ).

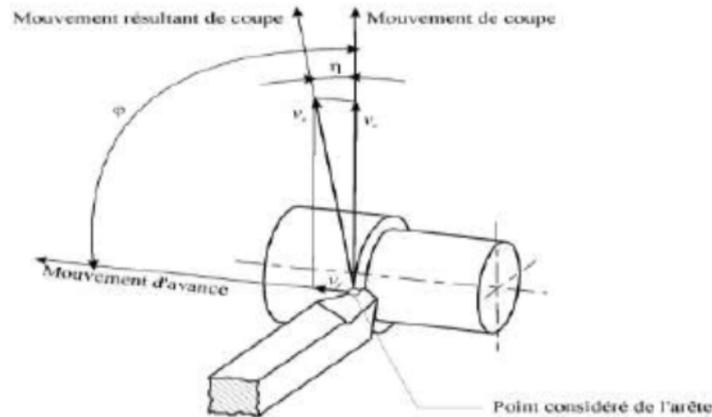


Figure II.7 : Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage.

f) Profondeur de coupe a_p

En chariotage, la profondeur de coupe a_p (mm) (figure II.8) 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'arête de l'outil.

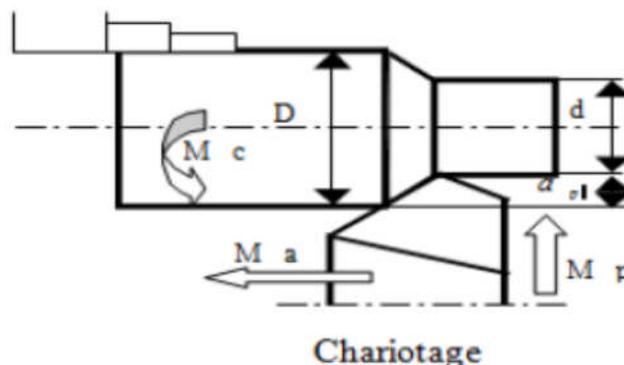


Figure II.8 : Représentation de la profondeur de passe a_p .

Il vaut mieux enlever les surépaisseurs d'usinage sans faire beaucoup de passes.

Pourtant, quand on prend une profondeur de passe très grande, la précision d'usinage diminue à cause de la présence des efforts de coupe très élevés. Dans ces cas, des vibrations apparaissent et l'état de surface devient plus mauvais. D'habitude, on choisit la profondeur de passe en dépendance des surépaisseurs d'usinage et de la rugosité superficielle demandée. Aussi le nombre de passe dépend de la rigidité du système machine-outil, pièce, outil. Si ce système a une faible rigidité, ou si on usine des pièces ayant le diamètre assez petit et la longueur assez grande, on choisit dans ce cas une profondeur de passe faible.

La profondeur de passe et l'avance vont influencer aussi sur la formation du copeau car elles modifient la section du copeau et donc l'énergie nécessaire au cisaillement de la matière.

7. Géométrie de l'outil de coupe en tournage

a. Plans de l'outil : (Fig. II.9)

a.1- Plans de l'outil en main

✓ Plan de référence de l'outil, Pr : plan passant par le point considéré de l'arête et contenant l'axe de l'outil (pour un outil tournant) ou parallèle au plan de base servant de face d'appui au corps de l'outil (pour un outil classique).

✓ Plan d'arête de l'outil, Ps : plan tangent à l'arête, au point considéré, et perpendiculaire au plan de référence de l'outil Pr.

✓ Plan de travail conventionnel, Pf : plan perpendiculaire au plan de référence de l'outil Pr, au point considéré de l'arête, et parallèle à la « direction supposée d'avance » de l'outil.

✓ Plan vers l'arrière de l'outil, Pp : plan perpendiculaire au plan de référence de l'outil Pr et au plan de travail conventionnel Pf, au point considéré de l'arête.

a.2- Plans de l'outil en travail

✓ Plan de référence en travail, Pre : plan perpendiculaire au point considéré de l'arête, à la direction de la vitesse résultante de coupe, c'est-à-dire à la direction instantanée du mouvement résultant du mouvement de coupe et du mouvement d'avance simultanés en ce point.

✓ Plan d'arête en travail, Pse : plan tangent à l'arête, au point considéré et perpendiculaire au plan de référence en travail Pre. Ce plan contient la direction de la vitesse résultante de coupe.

✓ Plan de travail, Pfe : plan contenant la direction de la vitesse de coupe et la direction de la vitesse d'avance au point considéré de l'arête. Ce plan est perpendiculaire au plan de référence en travail Pre.

✓ Plan vers l'arrière en travail, Ppe : plan perpendiculaire au plan de référence en travail Pre et au plan de travail Pfe, au point considéré de l'arête.

b. Angles de l'outil: (Fig. II.10)

b.1- Angles de l'arête (deux angles sont nécessaires)

✓ Angle de direction d'arête de l'outil k_r ou angle de direction d'arête en travail k_{re} : angle aigu mesuré dans le plan de référence Pr(Pre) entre le plan d'arête Ps(Pse) et le plan de travail Pf(Pfe).

✓ Angle d'inclinaison d'arête de l'outil l_s ou angle d'inclinaison d'arête en travail l_{se} : angle aigu mesuré dans le plan d'arête Ps(Pse) entre l'arête et le plan de référence Pr(Pre).

b.2- Angles des faces :

✓ Angle de dépouille a : angle aigu entre la face de dépouille Aa et le plan d'arête Ps(Pse).

✓ Angle de taillant b : angle aigu entre la face de coupe Ag et la face de dépouille Aa.

✓ Angle de coupe g : angle aigu entre la face de coupe Ag et le plan de référence Pr(Pre)

$$(a + b + g = 90^\circ).$$

Ces angles sont définis selon le besoin dans un des plans de sections suivants :

- ✓ $P_o(P_{oe})$: plan orthogonal de l'outil (orthogonal en travail), plan perpendiculaire au plan de référence $P_r(P_{re})$ et au plan d'arête $P_s(P_{se})$, au point considéré de l'arête ;
- $P_n(P_{ne})$: plan normal à l'arête, plan perpendiculaire à l'arête au point considéré ($P_n = P_{ne}$) ;
- P_f : plan de travail conventionnel (plan de travail P_{fe}) ;
- P_p : plan vers l'arrière de l'outil (plan vers l'arrière en travail P_{pe}).

Cet angle (entre le plan de référence P_f et la face de coupe de l'outil) résulte, dans le cas des outils à plaquettes rapportées, de la géométrie de la plaquette (angle de coupe intrinsèque à la plaquette) et de l'inclinaison que lui impose le porte-plaquette.

Dans le cas des outils monoblocs (en acier rapide par exemple), la géométrie est fixée à l'affûtage. La valeur de γ est déterminante dans le processus de formation du copeau.

Les matériaux tendres (bois, aluminium, aciers à faible résistance) se tournent avec des angles de coupe élevés (20 à 25° pour les alliages légers avec des outils en acier rapide), ce qui donne un tranchant marqué.

À l'inverse, les matériaux durs sont usinés avec des angles de coupe faibles, voire négatifs, ce qui permet de renforcer le taillant de l'outil, donc de le rendre plus résistant mécaniquement et thermiquement (figure II.9).

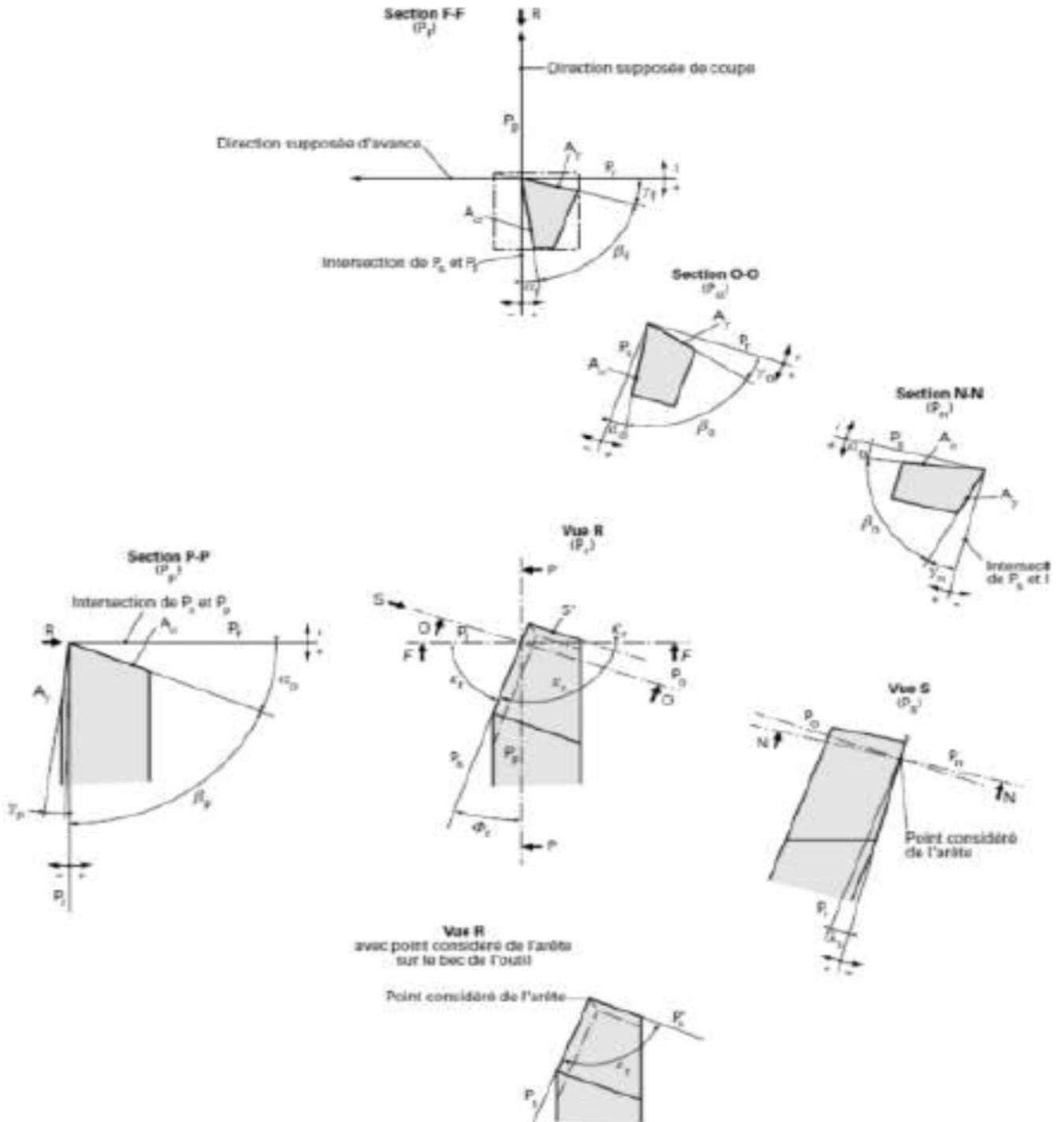


Figure II.9 : plans et angles en main sur les outils courants (outil à charioter droit).

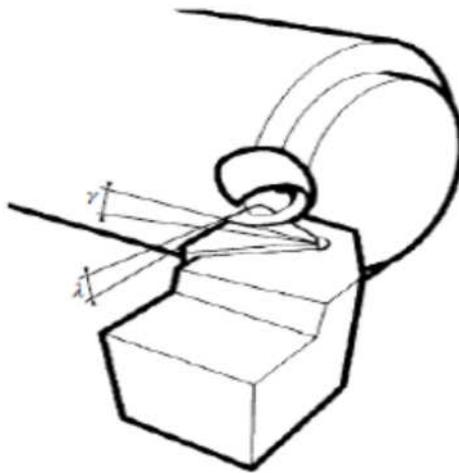


Figure II.10 : angles d'inclinaisons.

c. Angle de coupe latéral

Cet angle est vu dans le plan latéral (P_f) défini par la vitesse d'avance v_f et la vitesse de coupe v_c (figure II.11).

Cet angle (entre le plan de référence P_f et la face de coupe de l'outil) résulte, dans le cas des outils à plaquettes rapportées, de la géométrie de la plaquette (angle de coupe intrinsèque à la plaquette) et de l'inclinaison que lui impose le porte-plaquette.

Dans le cas des outils monobloc (en acier rapide par exemple), la géométrie est fixée à l'affûtage. La valeur est déterminante dans le processus de formation du copeau.

Les matériaux tendres (bois, aluminium, aciers à faible résistance) se tournent avec des angles de coupe élevés (20 à 25° pour les alliages légers avec des outils en acier rapide), ce qui donne un tranchant marqué.

À l'inverse, les matériaux durs sont usinés avec des angles de coupe faibles, voire négatifs, ce qui permet de renforcer le taillant de l'outil, donc de le rendre plus résistant mécaniquement et thermiquement (figure II.11).

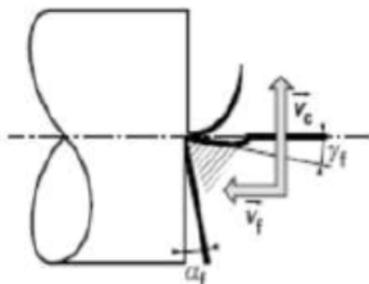


Figure II.11 : angle de coupe latéral.

d. Angle de dépouille latéral

Toujours dans le plan latéral (v_f ; v_c), on constate qu'un angle « de dépouille » est nécessaire pour éviter le frottement de la face en dépouille de l'outil sur la pièce.

Comme pour l'angle de coupe, sur les outils à pastille rapportée, l'angle de dépouille résulte de la géométrie de plaquette et de l'inclinaison conférée par le port-plaquette. La valeur numérique de cet angle de dépouille est de l'ordre de 4° .

e. Rayon de bec

Le rayon de bec est tangent aux deux arêtes de coupe se rencontrant en un point théorique P. Il élimine un angle aigu, qui constitue un point faible et ne présente aucun intérêt sur le plan fonctionnel (figure II.12.A).

e.1- Le rayon de bec détermine la résistance du bec d'outil :

L'une des conditions à remplir par le rayon de bec est la tenue, une plus grande section est mieux à même de résister à l'effort de coupe. Un grand rayon répartit aussi l'effort de coupe sur une plus grande longueur, ce qui améliore généralement la durée de vie de l'outil. La dissipation de la chaleur se fait également mieux lorsque le rayon est plus grand, réduisant ainsi les risques de variations thermiques dommageables.

Par ailleurs, un trop grand rayon de bec détermine sur une partie de l'arête de coupe des copeaux très minces, dont l'épaisseur ne permet plus la coupe réelle. Il y aura alors formation d'un copeau gratté, avec usure prématurée de l'outil, vibrations, perte de précision et dégradation de l'état de surface.

e.2- Choix du rayon de bec d'outil en fonction de la profondeur de passe: (figure II.12.B)

- ✓ En ébauche, choisir le plus grand rayon de bec possible pour obtenir une arête résistante.
- ✓ En finition, l'état de surface est amélioré en augmentant le rayon (ou en diminuant l'avance).
- ✓ L'apparition de vibrations limite l'augmentation du rayon.
- ✓ Le rayon de bec doit être compatible avec les rayons du profil de pièce à usiner.

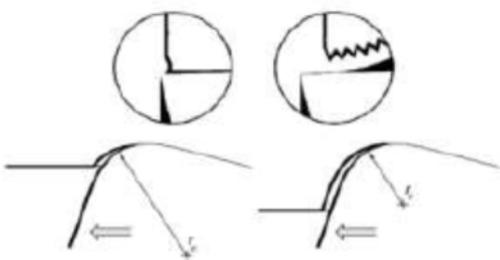


Figure II.12.A : rayon de bec d'outils.

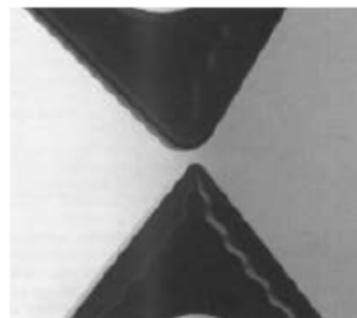


Figure II.12.B : choix de l'angle de bec selon la profondeur de passe.

f. Angle de pointe de l'outil

La pointe de l'outil, déterminée par les faces de coupe principale et secondaire, peut présenter un angle très variable (35 à 90°) suivant les outils.

La pointe de l'outil est la zone la plus sollicitée, mécaniquement et thermiquement.

Les outils à la pointe la plus élancée sont évidemment les plus fragiles, alors que les plaquettes rondes offrent une résistance très supérieure pour les usinages difficiles (figure II.13.A).

Le choix de l'angle de pointe est conditionné par la géométrie de la surface à usiner.

Pour ce profil, par exemple, seul un angle de pointe inférieur à 45°

(35° par exemple) convient (figure II.13.B).

Dans les limites admises par la géométrie, on choisira l'angle de pointe le plus élevé possible.

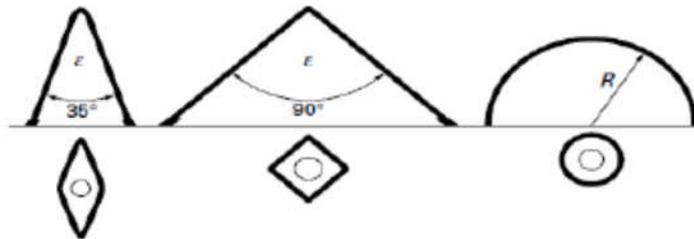


Figure II.13.A : Angle de pointe de l'outil.



Figure II.13.B : Choix de l'angle de pointe en fonction de la géométrie de la surface à usiner.

8. Choix d'un outil de coupe à plaquette rapportée

Une plaquette est la partie de l'outil qui usine, elle peut être de carbure ou de céramique et présente plusieurs faces actives.

Les outils de tournage actuels sont constitués la plupart du temps d'un porte-plaquette muni d'un dispositif de fixation de la plaquette et d'une plaquette interchangeable constituée d'une matière plus dure et comportant plusieurs arêtes de coupe.

Le changement d'arête de coupe intervient lorsque l'arête en service a atteint un degré d'usure qui l'empêche de respecter les tolérances des cotes à réaliser, ou la rugosité spécifiée, ou encore qui risque d'entraîner la rupture à plus ou moins brève échéance.

Pour effectuer le choix d'un outil de tournage, les paramètres à prendre en compte sont les suivants :

- Matière de la pièce, usinabilité ;

- Configuration de la pièce : forme, dimension, surépaisseurs d'usinage ;
- limitations : tolérances, état de surface ;
- Machine : type, puissance, conditions d'utilisation et caractéristiques;
- Stabilité, rigidité de la prise de pièce et de la pièce.
- **Processus de sélection** : L'approche suivante permet de choisir « pas à pas » les caractéristiques de l'outil de tournage convenant pour une application déterminée :
 - Système de fixation de la plaquette ;
 - Dimension et type de porte-plaquette ;
 - Forme de plaquette.
 - Taille de plaquette ;
 - Rayon de bec ;
 - Type de plaquette ;
 - Matière de l'outil.

On détaillera dans notre étude les points les plus importants du processus.

a) Dimension et type du porte-plaquette

Ce choix se fait en fonction de la direction de l'avance, la profondeur de passe, la nature de la pièce, la fixation de l'outil sur la machine et l'espace disponible. La forme de la pièce est un facteur décisif en contournage. Les opérations complexes peuvent être décomposées en différentes phases:

- 1) un chariotage ;
- 2) un dressage ;
- 3) un tournage conique en plongée ;
- 4) une remontée de cône ;
- 5) une remontée d'épaulement.

Les formes rondes peuvent être assimilées à des combinaisons de 3 et 4.

On cherche ensuite à trouver des combinaisons permettant de limiter le nombre d'outils tout en conservant un maximum de performances (rigidité d'outil, résistance d'arête...).

Les différents types de porte-plaquette sont définis par l'angle d'orientation d'arête et l'angle de pointe de la plaquette utilisée.

Un angle de pointe aigu donne une plus grande variété de profils usinables au détriment de la résistance du bec de l'outil : en **a**, un outil robuste, avec un grand angle de pointe, mais des possibilités limitées en contournage; en **b**, un outil élancé, capable de générer des profils très variés, des formes délicates, mais avec un bec beaucoup plus fragile.

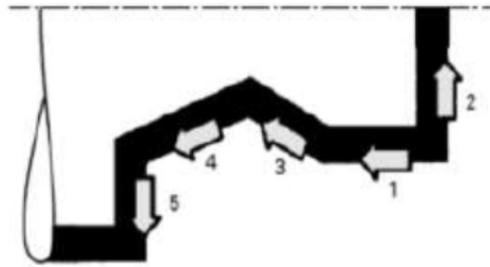


Figure II.14 : Décomposition d'un usinage.

b) Forme et dimension de la plaquette

Il s'agit de déterminer un compromis entre résistance (grand angle de pointe) et polyvalence (Petit angle de pointe). La (Figure II.15) montre les angles de pointe les plus courants sur les plaquettes, de la plaquette ronde à la plaquette à angle de pointe de 35 degrés et oriente le choix en fonction des paramètres prépondérants. Pour la dimension de la plaquette, il faut là aussi trouver un compromis coût-fiabilité.

Une plaquette plus grande et plus épaisse coûte plus cher, mais offre en contrepartie une meilleure sécurité d'arête, ce qui est particulièrement important en ébauche lourde ou usinage intermittent.

Facteurs affectant le choix	R	90	80	80	60	55	35	
Ébauche lourde.....	●	●	●	○	○			
Ébauche légère ; semi-finition.....		○	●	●	●	●		
Finition (complexité de forme).....			○	○	●	●	●	
Contournage (accessibilité).....			○	○	○	●	●	
Diversité d'opérations.....	○		●	○	○	●	○	
Puissance machine limitée..			○	○	●	●	●	
Limitation de la tendance aux vibrations.....				○	●	●	●	
Matériau usiné dur.....	●	●						
Coupe intermittente.....	●	●	○	○	○			
Grand angle d'arête.....			●	●	●	●	●	
Petit angle d'arête.....		●		●	●			

● le mieux adapté ; ○ adapté.

Figure II.15 : critères de choix pour la forme de la plaquette.

9. Matériaux utilisés pour les outils de coupe

Pour que l'arête tranchante d'un outil de coupe reste toujours vive, elle ne doit pas s'use; ainsi la matière qui la constitue doit être plus dure que la pièce à usiner. Le corps de l'outil doit résister aux contraintes de flexion et torsion dues à l'effort de coupe. La résilience du corps de l'outil doit être grande, car il ne doit pas casser lorsque se produiront de brusques variations de l'effort de coupe.

Les principales matières utilisées pour les outils de tournage modernes sont les suivantes (figure II.16) :

- Carbures revêtus (GC) ;
- Carbures non revêtus (C) ;
- Cermets (CT) ;
- Céramiques (CC) ;
- Nitrures de bore cubiques (CB) ;
- Diamants polycristallins (CD).

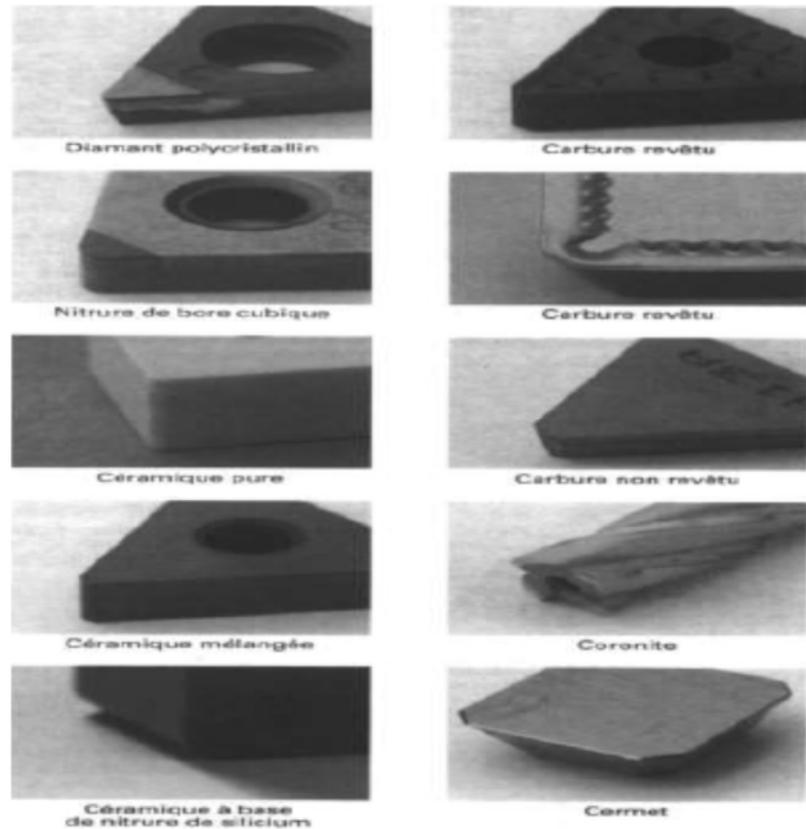


Figure II.16 : Différentes matières pour outils.

a) Les carbures non revêtus (C)

Ils sont obtenus par frittage (métallurgie des poudres) de substance dure (carbures de tungstène, de titane...) et de substance liante (cobalt...) qui confère sa ténacité à la plaquette.

Ces carbures non revêtus sont aujourd'hui utilisés dans des opérations spéciales, hors du domaine standard (figure II.17).



Figure II.17 : Carbures non revêtus.

b) Les carbures revêtus

Ils sont recouverts d'une couche de quelques micromètres de nitrure ou de carbure de titane, ou encore d'oxyde d'aluminium (figure II.18).

Ces revêtements, en réduisant les frottements copeau/outil et pièce/outil, améliorent très nettement les possibilités des outils.

Ils sont les plus utilisés dans un très grand nombre d'opérations de tournage, pour tous types d'usinage et pour une grande diversité de matières de pièces.

C'est donc le choix à envisager en priorité pour la plupart des opérations d'usinage.

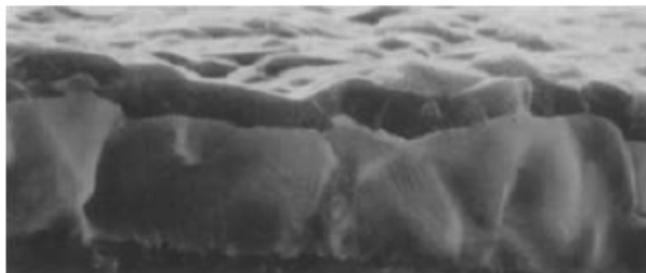


Figure II.18 : Carbures revêtus.

c) Les cermets

Ils sont des carbures à base de titane, liés au nickel et/ ou au cobalt. Ils conviennent pour l'ébauche légère et la finition dans des conditions favorables, en ce qui concerne la pièce et la machine-outil. La finition est leur spécialité, avec pour caractéristique un état de surface de haute qualité (figure II.19).

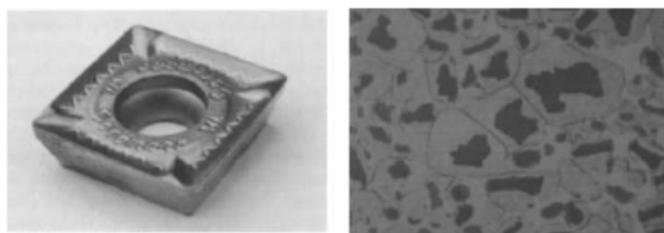


Figure II.19 : cermets.

d) Les céramiques (CC)

Ils constituent un éventail de nuances adaptées à une gamme étendue d'opérations. Cela va de la fonte et de l'acier à l'usinage hautement spécialisé de matières réfractaires et d'acier trempé. Le besoin de rectification, par exemple, peut être éliminé lorsqu'on recourt aux plaquettes céramiques pour le tournage. Extrêmement productives quand elles sont utilisées à bon escient, elles exigent toutefois un contexte d'usinage précis en matière de stabilité, de conditions de coupe, d'arête de coupe et de type de coupe. Les plaquettes céramiques sont conçues pour un taux élevé d'enlèvement de matière dans les situations où la précision des cotés et la qualité du fini de surface doivent demeurer inchangées tout au long de la durée de vie de l'outil. Cependant, elles ne conviennent pas pour certaines matières (figure II.20).

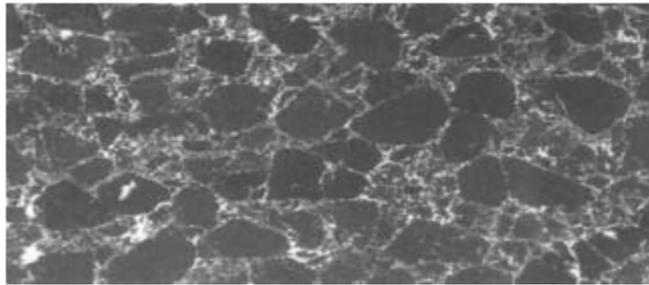


Figure II.20 : céramique.

e) Le nitrure de bore cubique (CB)

C'est une matière très dure, adaptée au tournage d'acier trempé, de fonte en coquille et d'alliages à base de nickel ou de cobalt. Les impératifs sont ici très rigoureux au niveau des conditions de coupe et de l'arête de coupe.

La productivité et la longévité sont nettement supérieures à celles des plaquettes céramiques ou en carbure, lorsqu'elles sont utilisées correctement. Les plaquettes en nitrure de bore cubique sont destinées en premier lieu à la finition (figure II.21).

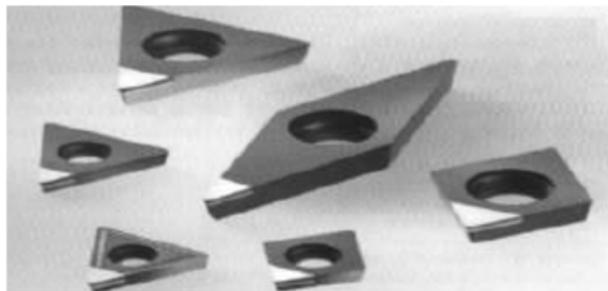


Figure II.21 : nitrure de bore cubique.

f) Les diamants poly-cristallins (CD)

Ils ont un domaine d'utilisation complètement différent, étant donné qu'ils sont totalement inappropriés pour les métaux contenant du carbone. Ils sont utilisés en finition et demi finition pour les métaux non ferreux et les matières non métalliques (figure II.22).

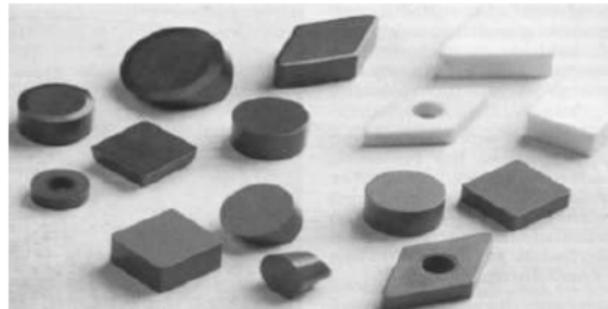


Figure II.22 : les diamants polycristallins.

On peut aussi récapituler les domaines d'emploi des différents matériaux d'outils (en incluant l'acier rapide) dans le diagramme de la figure II.23.

Ce diagramme est donné à titre indicatif pour situer les différents domaines des matériaux à outils. Il est représentatif des conditions normales d'utilisation de ces outils, en ébauche, pour les aciers et les fontes. Il ne peut être utilisé pour choisir les conditions de coupe.

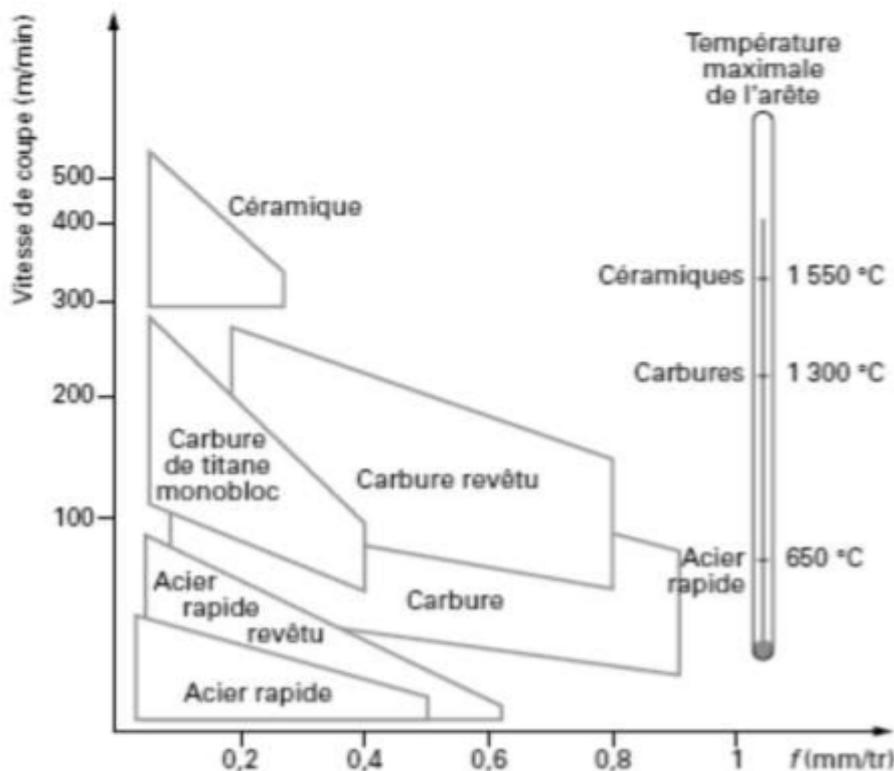


Figure II.23 : Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant.

CHAPITRE III

Etude et mesure de l'état de Surface



1. Nécessité de l'étude des états de surface :

L'aptitude d'une pièce à remplir une fonction donnée dépend d'un ensemble de facteurs et notamment des caractéristiques de ces états de surface (exemple : la rugosité). La mesure de l'état de surface fait partie des contrôles de métrologie au même titre que ceux des cotes et de formes de surface.

Dans beaucoup de systèmes mécaniques, des surfaces frottent les uns sur les autres. Leur état de surface a un grand effet sur le coefficient de frottement, si ce dernier augmente à cause des surfaces rugueuses, les forces de frottements augmentent, les surfaces s'échauffent et l'usure est accélérée.

L'état de surface est également à considérer lorsque des joints d'étanchéité sont installés entre des surfaces. Dans la figure III.1 un joint d'étanchéité torique est monté sur le piston d'un vérin hydraulique. Le détail du contact joint/alésage est repris dans le détail B. L'étanchéité souhaitée et la vie du joint dépendent de l'état de surface de l'alésage du vérin.

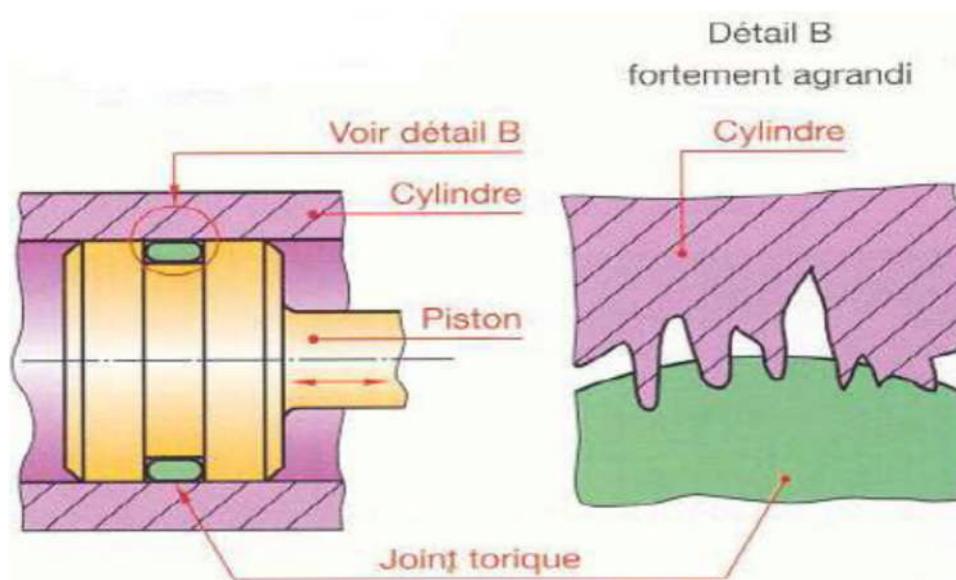


Figure III.1 : joint torique installé dans un vérin hydraulique.

2. Terminologie :

Avant d'aborder la définition des critères d'état de surface, certains termes doivent être classifiés : (figure III.2)

- **Surface géométrique** : c'est une surface parfaite qui est définie géométriquement par des côtes nominales.
- **Surface spécifiée** : c'est la surface géométrique affectée des tolérances de fabrication. Par exemple, dans le cas des états de surface pour une surface plane, la surface spécifiée est la surface qui possède les rugosités maximums acceptables par rapport à la surface plane parfaite. C'est la surface de rugosités maximales permises.
- **Surface réelle** : c'est la surface qui résulte de la fabrication.
- **Surface mesurée** : c'est la surface détectée par les instruments de mesure à partir de la surface réelle.

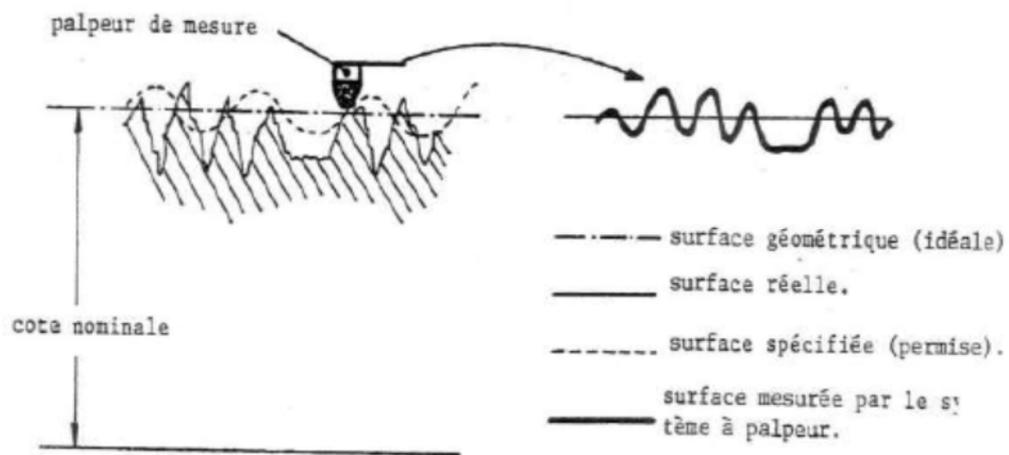


Figure III.2 : les quatre surfaces associées à l'évaluation d'un état de surface.

3. Analyse d'une surface :

Une surface est étudiée à partir de son profil, c'est-à-dire que si on coupe une surface par un plan, on obtient une courbe appelée « profil de surface ». C'est à partir de ce profil qu'on analyse les différents défauts de la surface (figure III.3). Les défauts détectés sont classés en quatre ordres qui sont schématisés dans la figure III.4.

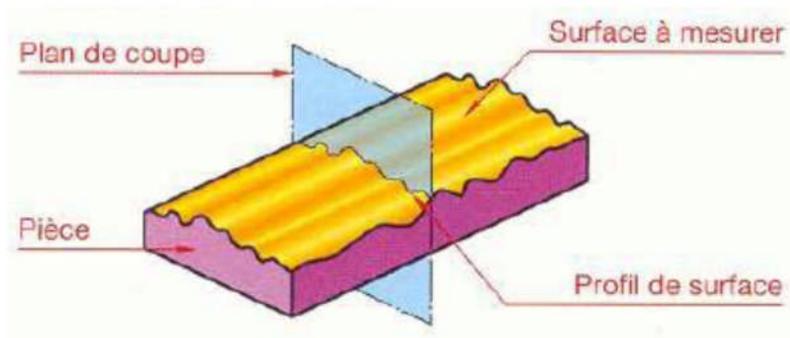


Figure III.3 : profil de surface.

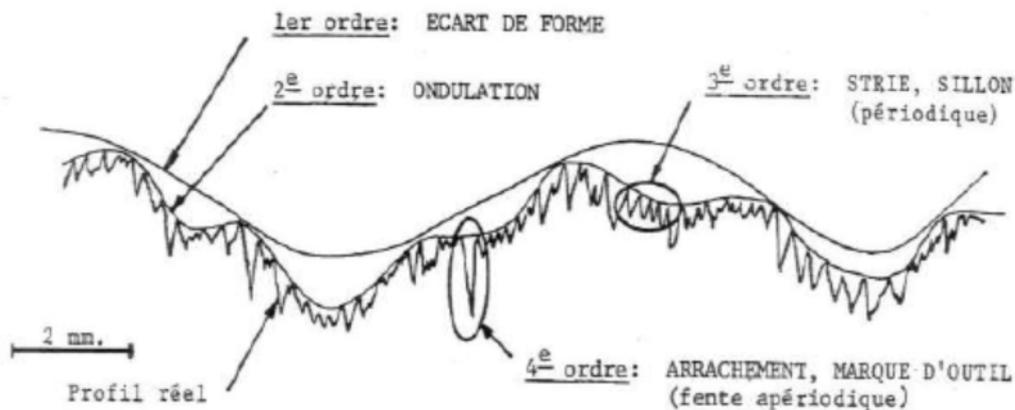


Figure III.4 : Les quatre ordres de défauts de surface.

1^{er} Ordre : *Ecart de forme*. Ces défauts affectent la résistance au roulement ainsi que les étanchéités statique et dynamique. Aussi appelés rectitude, planéité, cylindricité, conicité etc.

2^{ème} Ordre : *Ondulation*. Ces défauts proviennent généralement des traces d'avance d'outil et créent l'usure accélérée ainsi que par la majorité des saillies.

Les défauts suivants, de 3^{ème} et 4^{ème} ordre, représentent la *rugosité de surface* :

3^{ème} Ordre : *strie-sillon*. Ils proviennent de l'arrachement normal de la matière et affectent l'écoulement de fluides ainsi que l'étanchéité aux surfaces en contact.

4^{ème} Ordre : *fente-piqûre*. Ce type de défauts aperiodiques provient d'arrachements prononcés de matière. Il a un grand effet sur la résistance de la pièce en fatigue.

4. Caractéristiques du profil :

- **La longueur d'évaluation l_n** : longueur, mesurée suivant la direction générale du profil. (figure III.5.A)
- **Longueur de base l_r** : partie de la longueur d'évaluation utilisée pour séparer les irrégularités du profil. (figure III.5.A)
- **Ligne enveloppe supérieure** : segments de droites joignant les points les plus hauts des saillies locales du profil. (figure III.5.B)
- **Ligne moyenne** : c'est une droite ayant la direction générale du profil et qui divise le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base, la somme des carrés des écarts à partir de cette ligne soit minimale « ligne des moindres carrés ». (figure III.5.C).

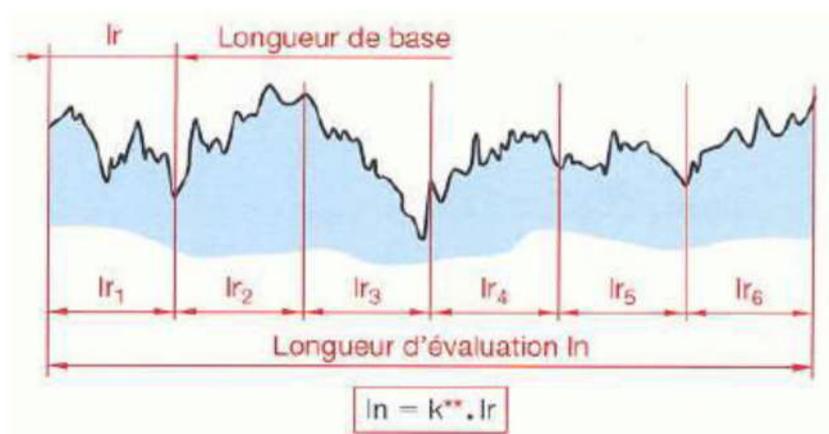


Figure III.5.A : longueur d'évaluation et de base.



Figure III.5.B : ligne d'enveloppe supérieure.

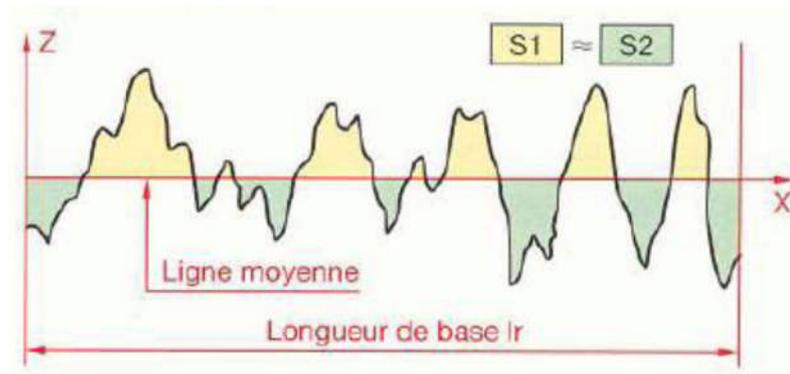


Figure III.5.C : ligne moyenne.

5. Les critères d'état de surface :

Les critères d'état de surface concernent les défauts du deuxième au quatrième ordre. En réalité, il existe dix huit (18) critères de profil. Seuls les critères les plus couramment utilisés dans l'industrie seront présentés dans ce chapitre.

Les critères sont des valeurs dimensionnelles exprimées en micromètres (um) dans le système international et en micro-pouce (upo) dans le système anglais. Ils sont classés en deux catégories : les critères physiques et statistiques.

a) Les critères physiques :

➤ **Ondulation** : (défauts de deuxième ordre)

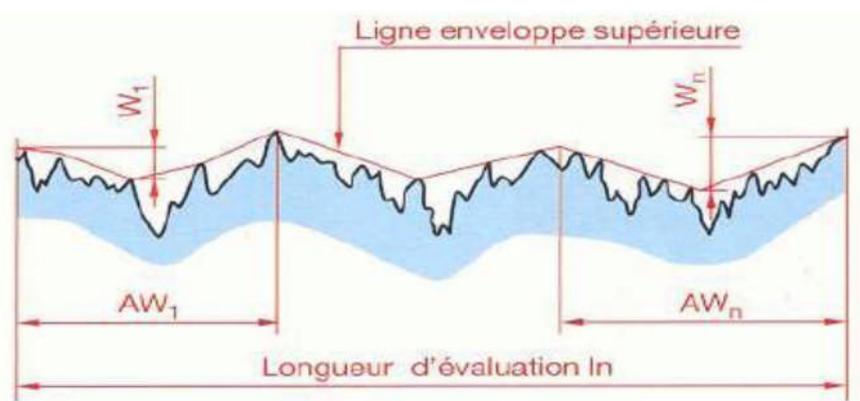


Figure III.6.A : mesure des défauts d'ondulation.

Sur cette figure apparaissent deux périodes d'ondulation d'amplitude W et de pas Aw . Sur un profil de 'n' ondulations, deux critères physiques sont mesurés tels que :

- **Amplitude moyenne d'ondulation, $W = \frac{1}{2} \sum_1^n w_i$ (2.1)**
- **Pas moyen d'ondulation, $AW = \frac{1}{2} \sum_1^n Aw_i$ (2.2)**
- **Rugosité** : (défauts de troisième et quatrième ordre).

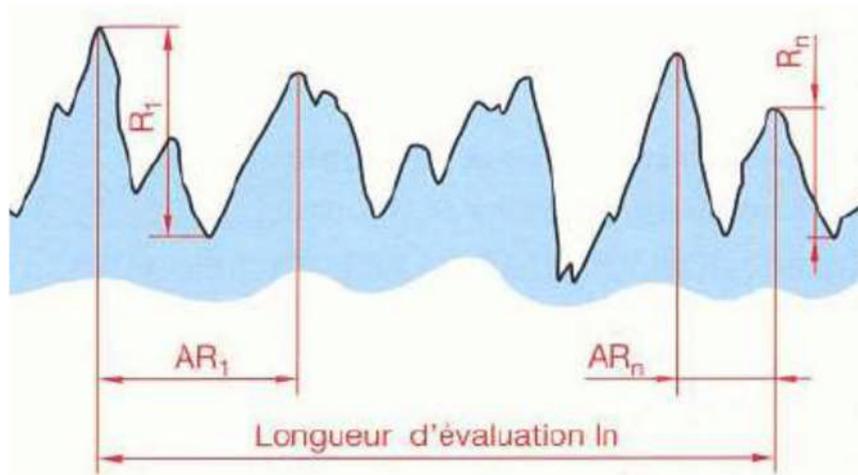


Figure III.6.B : mesure des défauts de rugosité.

Sur cette figure apparaissent les trois critères physique de rugosité les plus significatifs sont mesurés sur un profil de “n” ondulations, tels que :

- **Amplitude moyenne de rugosité, $R = \frac{1}{n} \sum_1^n R_i$**
- **Pas moyenne de rugosité, $Ar = \frac{1}{n} \sum_1^n Ar_i$**

-Amplitude maximale de rugosité, R_{max}

De ces trois critères physiques, **R** est le plus fréquemment utilisé en industrie, il représente la profondeur moyenne entre deux crêtes consécutives.

b) Les critères statistiques :

En réalité les critères statistiques sont au nombre de cinq (5). La majorité des appareils de mesure est toutefois équipée pour exprimer la rugosité de surface par :

- **L'écart moyen arithmétique** : $Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |(Z(x)_R) - d(x)_R| dx$

Ce critère est obtenu par rapport à la ligne moyenne L qui répartit équitablement sur le profil surfaces de matière des crêtes et les surfaces creusées par les sillons (profondeur moyenne de rugosité).

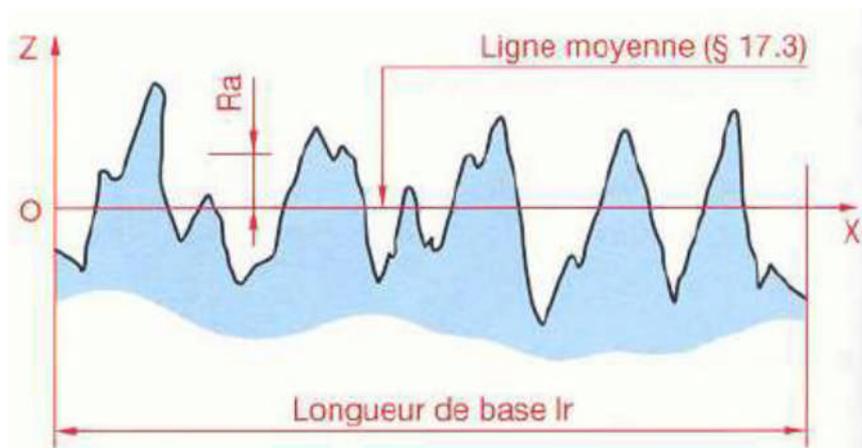


Figure III.6.C : mesure des défauts de rugosité Ra.

6. Indications des exigences d'états de surface :

Les indications des exigences d'états de surface sont précisées à l'aide de symboles graphiques et d'indications textuelles. Le tableau 7 indique la signification de chaque symbole graphique.

Ces symboles graphiques doivent être complétés par l'indication d'un ou plusieurs paramètres d'états avec leur valeur numérique.

Il est parfois nécessaire de préciser d'autres exigences, telles que le procédé de fabrication, les conditions de mesures, etc. (tableau III.1).

Sur une pièce mécanique, les spécifications d'état de surface n'apparaissent que sur les surfaces jouant un rôle fonctionnel, exemple : surfaces de frottement, de glissement et de roulement, surfaces devant recevoir un dépôt électrolytique ou un revêtement de peinture. Les surfaces des pièces sollicitées à des forces cycliques doivent aussi répondre à des exigences de rugosité car la vie de la pièce est directement liée à l'état de surface.

Les spécifications d'état de surface englobent plusieurs informations qui sont regroupées autour d'un signe radical apposé sur la surface telle que le montre la figure III.7.

Symbole graphique	Signification
	Symbole graphique de base, tout procédé de fabrication autorisé
	Enlèvement de matière exigé
	Enlèvement de matière interdit
	Symbole graphique complet
	Pour toutes les surfaces sur le contour de la pièce

Tableau III.1 : symbole de base.

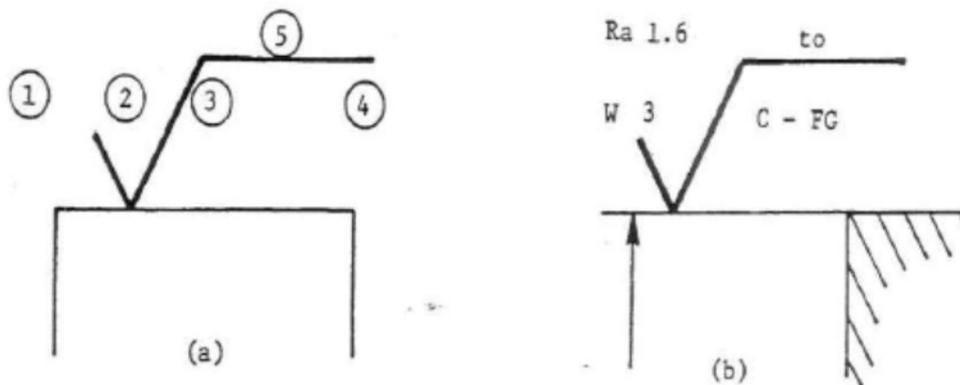


Figure III.7 : (a) signe radical d'état de surface avec ses cinq localisations d'information.

(b) Exemple de spécification complète d'état de surface.

La figure III.7. (a) représente seulement les localisations 1, 2, 3, 4 et 5 autour du signe radical, l'attribution de chacune de ces localisations est défini dans le texte. Un exemple de spécification complétée d'état de surface est repris à la figure III.7. (b).

Attributions des localisations à la figure III.7 :

A. *Localisation 1* : symbolisation(s) du ou des critère(s) d'état de surface demandé(s), exemple : Ra et W à la figure III.7. (b).

B. *Localisation 2* : valeur(s) numérique(s) du ou des critère(s) demandé(s), exemple : 1.6 et 3 μm ou μpo (micromètre, micro-pouce*) suivant le système adopté dans le dessin.

Les valeurs minimale et maximale des critères peuvent aussi être mentionnées au lieu de la valeur maximum seulement.

C. *Localisation 3* : direction et type des stries d'usinage par rapport à la surface. Ces informations sont précisées à la figure III.8. le sens des stries d'usinage doit par exemple être dans le sens du déplacement des surfaces pour le cas des surfaces de frottement.

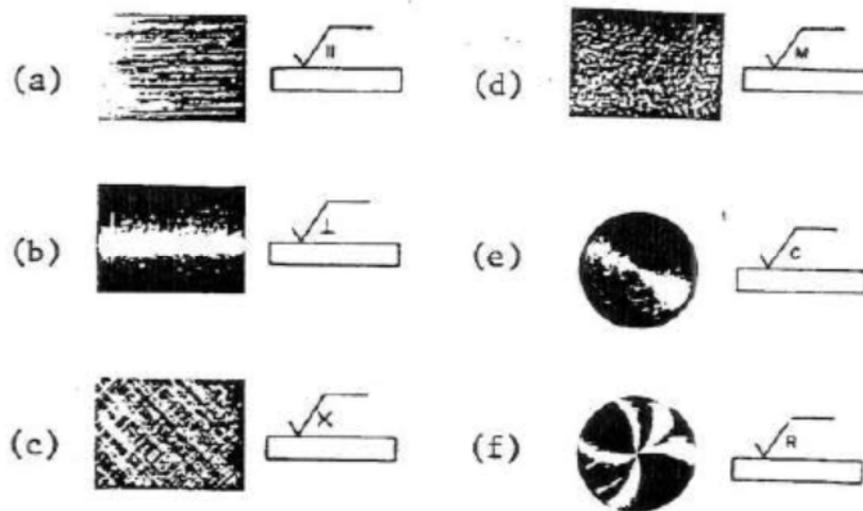


Figure III.8 : six symboles de direction et de type des stries d'usinage.

(*) $1\mu\text{m} \approx 40 \mu\text{po}$; $11 \text{ mm} \approx 39 / 1000 \text{ po}$.

Description des six symboles de direction et de type de stries de la figure II.8 :

(a) : Parallèle à la ligne de projection su signe radical sur la surface.

(b) : Perpendiculaire à la ligne de projection su signe radical sur la surface.

(c) : Croisé, chaque direction étant à 45° degrés par rapport à la ligne de projection susigne radical.

(d) : Multidirectionnel.

(e) : Circulaire par rapport au centre de la surface.

(f) : Approximativement radial en partant du centre de la surface.

D. *Localisation 4* : fonction de la surface : présente la symbolisation des différentes fonctions de surface ainsi que l'écart moyen arithmétique (Ra) et l'amplitude moyenne (R) suggérés pour ces fonctions.

E. *Localisation 5* : procédé d'usinage proposé. Le tableau III.2 donne les abréviations des différents procédés d'usinage, exemple : to, tournage (figure III.7. (b)).

Symboles normalisés des procédés d'élaboration					
Alésage	Al	Forgeage	Fo	Perçage	pe
Brochage	Br	Galetage	Ga	Pierrage	Pi
Découpage	De	Grattage	Gr	Polissage	Po
dressage	Dr	Grenaillage angulaire	Gna	Rabotage	Rb
Electroérosion	Eé	Grenaillage sphérique	Gns	Rectification cylindrique	Rcc
Electroformage	Ef	Lamage	Lm	Rectification plane	Rcp
Estompage	Es	Laminage à chaud	Lac	Rodage	Rd
Etincelage	Ei	Laminage à froid	Laf	Sablage humide	Sah
Etirage	Et	Matriçage	Ma	Sablage à sec	Sas
Filetage	Fl	Meulage	Me	Sciage	Sc
Fraisage en bout	Frb	Moulage coquille	Moc	Superfinition	Sf
Fraisage en roulement	frr	Moulage sable	Mos	tournage	To

Tableau III.2 : symbolisation des différents procédés d'usinage.

7. Les appareils de mesure d'état de surface :

Les développements technologiques des deux dernières décennies ont eu un grand impact sur les appareils de mesure d'état de surface. Cette section ne traite pas en détail tous les appareils existants, mais présente plutôt les appareils les plus utilisés dans l'industrie ainsi que quelques nouveaux principes appliqués à ce domaine de la métrologie.

A. Les échantillons Viso-tactiles :

La figure III.9 montre une plaquette d'échantillons Viso-tactiles obtenus par usinages contrôlés. Les échantillons ont des rugosités graduelles bien identifiées suivent le procédé d'usinage. Le tableau III.3 montre la valeur de Ra pour chaque classe de la plaque d'échantillons. Ces échantillons permettent une comparaison visuelle ou au toucher avec la pièce usinée. L'opérateur estime l'échantillon le plus proche de la surface usinée.

Cette méthode, peu coûteuse et rapide, est très flexible dans son application quoiqu'elle ne procure pas une mesure rigoureuse.

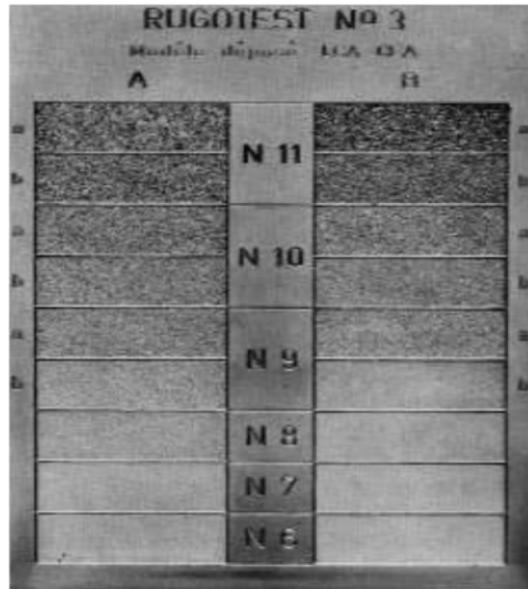


Figure III.9 : plaque de échantillons Viso-tactiles.

Classe	N6	N7	N8	N9	N10	N11
Rugosité Ra (µm)	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5	25

Tableau III.3 : les valeurs de Ra selon les classes de la plaque de échantillons.

B. Les appareils électroniques à palpeur :

La figure III.10 montre le principe de mesure de ces appareils. Un bras se déplace parallèlement à la surface à mesurer. Le bras possède soit un patin et un palpeur (figure III.11), soit seulement un palpeur (figure III.12), dans ce cas le mouvement est guidé hors de la pièce à mesurer.

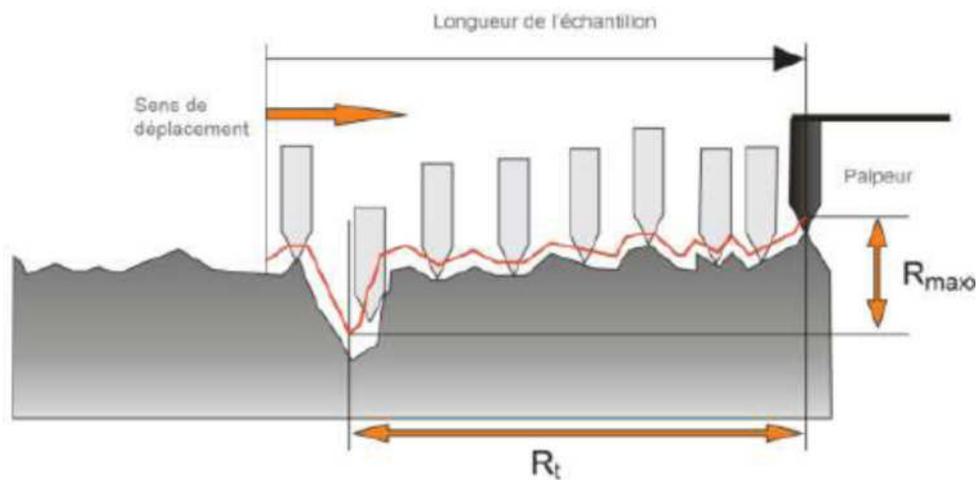


Figure III.10 : principe de mesure d'un appareil à palpeur.



Figure III.11 : appareil électronique de mesure a palpeur et patin.



Figure III.12 : appareil électronique de mesure a palpeur.

Ces appareils sont très répandus dans l'industrie. Quoique la géométrie du palpeur ne permette pas toujours de détecter les défauts de quatrième ordre, ils procurent plus d'informations que les échantillons Viso-tactiles. Le profil rugueux peut être enregistré. Les capteurs, très sensibles, s'adaptent facilement à l'instrumentation électronique. Généralement les données sont fournies directement sous un critère (R_a ou R), ou sous forme de graphe tel que montrées dans la figure III.13.



Figure III.13 : sortie numérique et graphique d'une mesure d'état de surface.

C. Les appareils optiques :

Les appareils optiques permettent de détecter surtout les défauts de troisième et quatrième ordre. Ils sont plus rarement employés dans l'industrie de production car ils demandent beaucoup de soins et de précautions.

• Le microscope à éclairage oblique :

Deux lumières obliques de différentes couleurs éclairent la surface de la pièce en augmentant la qualité des détails de l'image. Cette image est observée à l'aide d'un microscope où des échelles de dimension sont incorporées sur la lentille (figure III.14).



Figure III.14 : microscope à éclairage oblique.

• Le microscope interférentiel :

Un premier système optique dédouble le faisceau lumineux avant qu'il ne traverse l'objet et un second fait interférer les deux, produisant un contraste artificiel très marqué là où les rayons sont déphasés. À l'observation, on voit une image essentiellement en noir et blanc où les différentes structures apparaissent bordées de blanc d'un côté et de noir de l'autre, induisant une impression (fausse) de relief. On peut aussi obtenir des images en couleurs.

Des franges lumineuses d'interférence éclairent une mince partie de la pièce qui est observé au microscope avec un agrandissement x500.

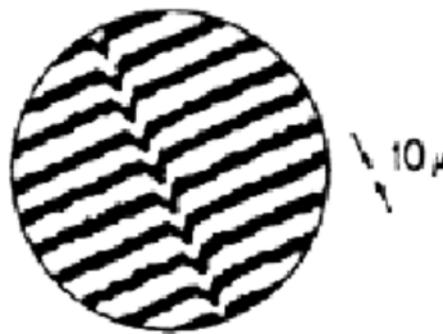


Figure III.15 : image obtenue avec un microscope interférentiel.

• Le réflectomètre :

La réflectométrie est de nos jours couramment utilisée pour caractériser la structure des systèmes de très faibles dimensions, la rugosité est un problème étudié depuis de longues années car ses conséquences fonctionnelles économiques sont importantes. L'étude par la réflectométrie diffuse de la rugosité des surfaces usinées et leur description en utilisant les méthodes connues de la théorie fractale permet d'étudier la morphologie des surfaces usinées.

Cette méthode est basée sur la relation entre la rugosité de la surface et la quantité de lumière incidente diffractée. Ce principe ne peut donner qu'une valeur moyenne (exemple : Ra).

8. Procédés de fabrication et états de surface :

Le tableau II.4 présente les plages de rugosité des surfaces brutes et usinées en fonction des procédés de fabrication. La rugosité est exprimée par l'écart moyen arithmétique Ra en μm .

Lors du choix des machines-outils, nous ferons référence à ce tablea

États de surface en fonction du procédé de fabrication - Surfaces brutes														
Procédé de fabrication			Écart moyen arithmétique R_a en μm											
Procédé	Symbole		50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025
Estampage	es													
Forgeage	fo													
Grenaillage	gn													
Laminage	filage - extrusion à chaud	lac												
	tréfilage - étirage à froid	laf												
Matriçage	à chaud	ma												
	à froid													
Moulage	au sable	mo												
	cire perdue - procédé Schaw													
	en coquille par gravité													
	en coquille sous pression													
Moulage plastique	mo													
Sablage	sa													
Procédé	Symbole		160	80	40	16	10	4	2	1	0,5	0,25	0,12	0,06
Procédé de fabrication			Profondeur moyenne de rugosité R en μm											

Tableau III.4 : procédés de fabrication et états de surface.

9. Exploration des méthodes de mesure :

Comme mentionné précédemment, aucun critère de profil n'a de signification sans la spécification de la technique de mesure.

Le tableau II.5 illustre le classement des défauts par numéro d'ordre et des méthodes d'exploration énumérées ci-dessus.

	Ecart de forme	Ondulation	Rugosité	
	Ordre 1	Ordre 2	Ordre 3	Ordre 4
Appareillage classique	•	○		
Appareils à palpeur touche	•	•	○	
Echantillons Viso-tactiles		○	•	•
Appareils optique		○	•	•
Appareils à palpeur aiguille	○	•	•	•

Tableau III.5: Le classement des défauts par numéro d'ordre et des méthodes d'exploration.

10. Conclusion :

Dans ce chapitre, on donne un aperçu général sur la surface usinée, l'importance de sa qualité dans les systèmes mécaniques, les principaux défauts qui peuvent survenir, leurs définitions ainsi que les moyens utilisés pour la mesure de l'état de surface.

CHAPITRE IV

Paramètres influent sur la précision de l'état de surface



1. Introduction

La pièce est définie par un cahier des charges : le dessin de définition de la pièce. Nous considérons que suite à la conception détaillée, sa définition est stabilisée sans aucune évolution majeure remettant en cause les spécifications. Il est le point de départ sous forme contractuelle entre le fabricant et le concepteur pour garantir l'aptitude de l'emploi de la pièce, soit de satisfaire la ou les fonctions prévues par le cahier des charges fonctionnel.

Des données relatives aux formes (dimensions nominales et spécifications avec tolérances) et à l'état de surface constituent l'essentiel des informations contenues dans un dessin technique. Les surfaces usinées, résultant de processus d'usinage quels qu'ils soient, sont caractérisées par des défauts ou des écarts par rapport à un nominal. Nous faisons une distinction entre les spécifications externes et internes. Les spécifications dites externes concernent les écarts dimensionnels et géométriques. Nous parlerons plus particulièrement sur les défauts de l'état de surface et les paramètres qui influent sur sa qualité.

2. Formulation géométrique de surface de finition

L'opération de tournage génère une topographie de surface hélicoïdale, dont on extrait un profil par palpation via un rugosimètre. Il est possible de modéliser ce profil réel par un profil théorique, soit une succession d'arcs de cercle ayant pour rayon le rayon de bec de l'outil et dont le pas correspond à l'avance par tour de l'outil (f). Des paramètres sont nécessaires afin de caractériser la fonctionnalité de la surface obtenue vis-à-vis du cahier des charges. En mécanique générale, on définit généralement les paramètres **Ra** et **Rt**.

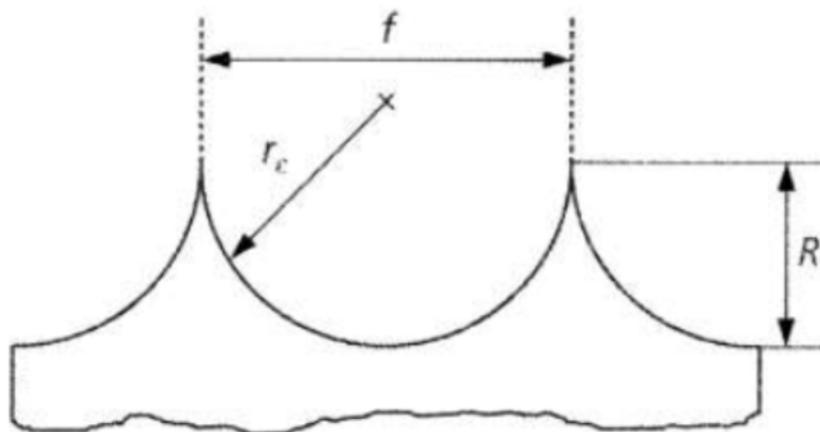


Figure IV.1 : topographie de surface obtenue en tournage et son profil théorique associé.

Soit la relation reliant le paramètre de rugosité R_t et les quantités r_ϵ et f :

$$r_\epsilon^2 = \left(\frac{f}{2}\right)^2 + (r_\epsilon - R_t)^2 = \frac{f^2}{4} + r_\epsilon^2 - 2r_\epsilon \cdot R_t + R_t^2$$

Or en constatant que $R_t \ll r_\epsilon \rightarrow R_t^2 \ll r_\epsilon^2$, l'équation précédente devient :

$$r_\epsilon^2 = \frac{f^2}{4} + r_\epsilon^2 - 2r_\epsilon \cdot R_t \rightarrow \frac{f^2}{8 \cdot r_\epsilon} \quad (r_\epsilon \text{ en mm})$$

Si on exprime R_t en μm , f et r_ϵ en mm, on obtient :

$$R_t = 125 \frac{f^2}{r_\epsilon}$$

Si on ne fait pas la simplification, R_t est la solution d'une équation du second degré. Alors on obtient :

$$R_t = \frac{2r_\epsilon - \sqrt{4r_\epsilon^2 - f^2}}{2}$$

De même, à partir du profil théorique, on peut déterminer une relation donnant R_a :

$$R_z = R_t = \frac{f^2}{18\sqrt{3}r_\epsilon} = R_p + R_v$$

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |(Z(x)_R)| dx_R$$

Avec R_p et R_v respectivement la plus grande saillie et le plus grand creux du profil mesuré.

Ce modèle géométrique néglige tous les problèmes liés à l'arrachement, à l'usure au niveau du bec de l'outil, ainsi que les problèmes de l'arête secondaire. Ces hypothèses sur la forme théorique font que l'emploi du modèle conduit à une erreur non négligeable à la vue de l'imprécision liée à ces hypothèses. Les profils sont supposés être constitués d'une succession d'arcs de cercle. En pratique, on peut retrouver la trace laissée par l'arête secondaire (cas où l'angle de direction de l'arête secondaire en travail χ_r' est faible : par exemple les travaux de plongée) (figure IV.2). En réalité, ce phénomène peut être observé si l'avance est grande $f > 2 r_\epsilon \sin \chi_r'$.

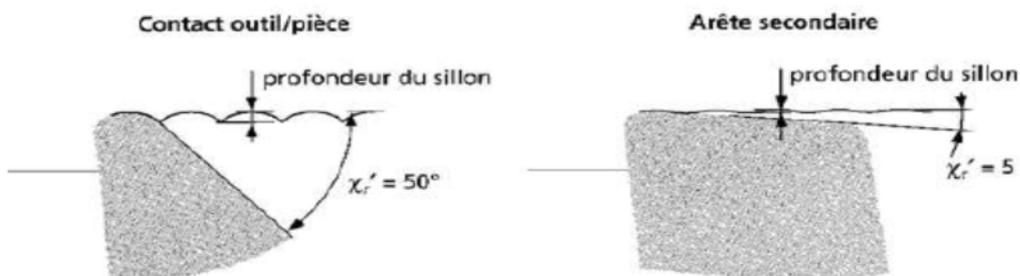


Figure IV.2 : influence de l'arête secondaire sur le profil de rugosité.

3. Formulation phénoménologique :

Les modèles phénoménologiques, basés sur des relevés expérimentaux et des optimisations algorithmiques, peuvent paraître compliqués et difficiles d'exploitation mais reflètent précisément les phénomènes physiques observés. Ils permettent également de tenir compte de la notion de nappe de réponse due à des problèmes de répétition. Par ailleurs, ces modèles donnent des réponses instables en dehors de leur domaine d'établissements. Ils sont utilisés uniquement dans des bases de données métiers du type TOOL LIGTH et sont identifiés pour chaque triplet : outil/matière/opération.

4. Influence de la dureté du matériau usiné et usinant :

La qualité de surface obtenue sera en général meilleure si la dureté est plus grande, car les phénomènes d'arrachements tendent à disparaître. On obtient une rupture fragile dans la zone de séparation du métal, ce qui conduit à un faciès de rupture net (R_a faible). L'application pratique de cette propriété se fait dans les opérations dites de tournage dur (dureté > 55 HR) à l'aide d'outil c-BN et pour lesquels on peut obtenir des états de surface concurrençant directement les procédés de rectification cylindrique.

Tous les matériaux ne permettent pas d'obtenir des finitions de surface de la même qualité.

D'un point de vue général, il faut retenir que les matériaux durs et les matériaux à fine structure de forme globulaire permettent d'obtenir les meilleurs états de surface.

La structure du matériau usiné est très importante. Il faut éviter autant que possible des amas de ferrite.

En effet la ferrite est un constituant doux qui favorise l'établissement d'arête rapportée et détériore l'état de surface. Une répartition homogène des constituants est favorable (absence de bandes), de même qu'un grain fin. En tournage, dans les aciers à carbone moyen (42CrMo4 par exemple), la perlite globulaire est souvent préférable à une structure lamellaire, mais l'inverse est vrai pour d'autres types d'usinage comme le brochage afin de diminuer les efforts de coupe et de faciliter la fragmentation du copeau.

Dans les aciers, les additions d'éléments formateurs d'inclusions (S, Pb, Te, Se) ou d'éléments durcisseurs de la ferrite (P, N) ont en général pour effet de diminuer ou de stabiliser l'arête rapportée. Ils auront donc une influence bénéfique sur la finition de surface dans les opérations à basse vitesse de coupe (utilisation d'acier rapides supérieur –ARS– ou opérations de filetage ou de tronçonnage, etc.).

Pour les opérations à l'outil de carbure à grande vitesse, où l'arête rapportée n'intervient pas, il semble que les éléments S, Se et Te n'aient que peu d'influence directe sur l'état de surface obtenu. Autrement dit, on n'obtient pas un meilleur état de surface avec un 42CrMo4resulfuré qu'avec un 42CrMo4 normal en tournage carbure en finition. Cependant la nuance à usinabilité améliorée, du fait de l'usure moindre, permet de maintenir plus longtemps la qualité de l'état de surface recherchée ou de réaliser des pièces de fini de surface donnée avec une productivité meilleure.

5. Influence du taux d'écroissage du matériau usiné :

Cette influence est traduite par la figure IV.3 **La courbe 1** correspond au tournage frontal d'un disque d'acier avec une avance $f = 0.32 \text{ mm/tr}$; **la courbe 2** reprend les mêmes éléments, le disque ayant été préalablement forgé au marteau-pilon à vapeur, tandis que **la courbe 3** montre les mêmes opérations réalisées sur un disque écroui davantage au marteau pilon pneumatique. On constate un net déplacement vers la droite du maximum de la courbe $R_{\max}=f(v)$, donc vers des plus grandes vitesses lorsque le taux d'écroissage augmente, et qu'il s'abaisse, en outre, vers des R_{\max} plus petits.

En général, l'écroissage entraîne une amélioration de l'état des surfaces usinées.

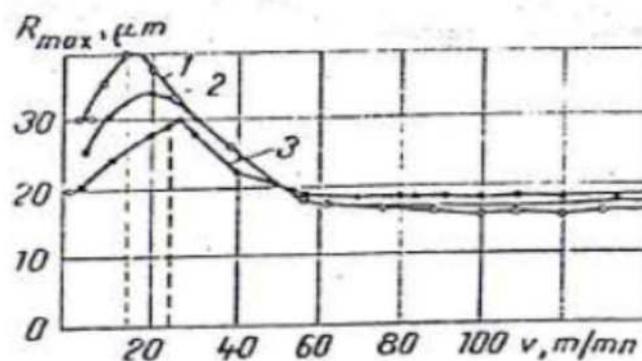


Figure IV.3 : Influence de l'écroissage prélabable du matériau brut sur son état de surface après usinage.

6. Influence des paramètres définissant le régime de coupe :

Dans ce paragraphe, il sera question essentiellement des trois paramètres traditionnels définissant le régime de coupe : vitesse, avance et profondeur de passe, étudiés à travers l'influence qu'ils peuvent avoir sur l'état de surface final, tant par leur activité déployée au profit des déformations plastiques que sous l'aspect purement géométrique.

a. Avance :

L'avance est un paramètre fondamental pour la rugosité des surfaces usinées. Une analyse expérimentale permet de confirmer cette évidence géométrique. À partir des résultats expérimentaux, on peut tracer l'allure générale d'une courbe passante au mieux par les points (figure IV.4).

Matière usinée : C35-HB 180. Outil : carbure P15. Conditions de coupe $V_c=120\text{m/min}$

$\alpha_p=1,1\text{mm}$

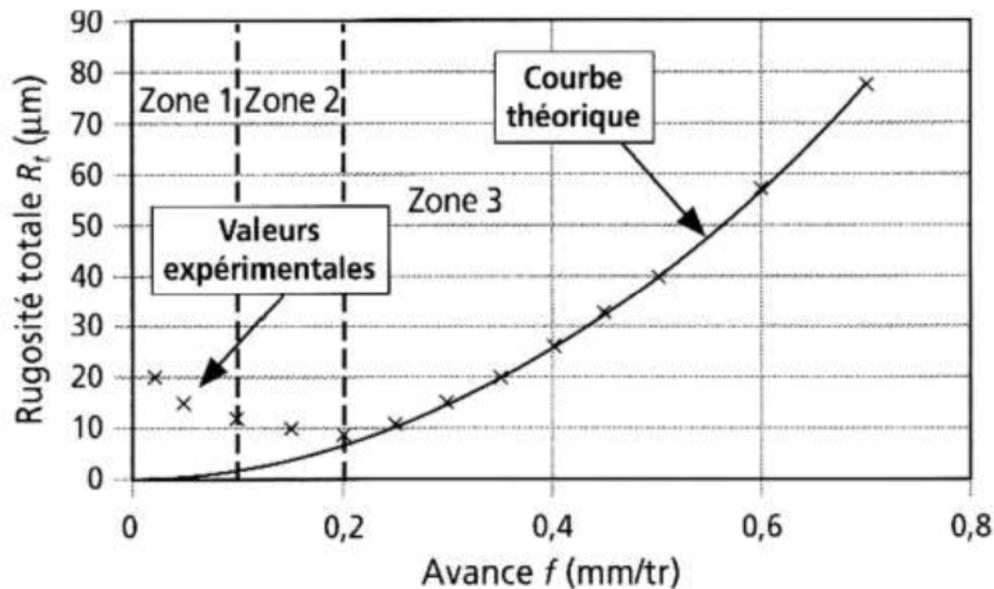


Figure IV.4 : Evolution de la rugosité totale en fonction de l'avance en chariotage

Zone 1 : les résultats expérimentaux sont éloignés de ceux du modèle. Il semble qu'une diminution trop importante de l'avance entraîne une augmentation des paramètres de rugosité.

L'épaisseur nominale de coupe devient trop faible ($h_p - f \sin \alpha_r$). L'outil ne peut plus couper, mais arrache la matière de la pièce. Les écarts de quatrième ordre deviennent très importants, l'hypothèse du modèle géométrique simple n'est plus vérifiée. L'étendue de cette hypothèse est fonction de la qualité de l'acuité de l'arête principale de coupe et de son stade d'usure, et surtout de la vitesse de coupe. Si on augmente la vitesse de coupe (V_c), alors la zone 1 diminue et la coupe se fait dans de meilleures conditions. On se rapproche beaucoup du modèle. D'où l'intérêt des céramiques et des c-BN (nitrure de bore cubique) permettant d'usiner à des vitesses de coupe très élevées et ainsi d'avoir un état de surface remarquable, même avec des avances faibles. En usinant très vite, on met en évidence les caractéristiques viscoplastiques du matériau. Les grandes vitesses de déformation induisent une rupture fragile conduisant à un état de surface plus lisse. C'est un des aspects intéressants de l'usinage à grande et à très grande vitesse.

Zone 2 : les résultats expérimentaux sont toujours supérieurs à ceux donnés par le modèle.

Mais les valeurs deviennent comparables. Les écarts du quatrième ordre sont la cause de cette différence.

Zone 3 : les résultats expérimentaux sont en accord avec ceux du modèle. La coupe se fait dans de bonnes conditions et l'état de surface des sillons est net.

Il faudrait en toute rigueur donner au modèle un domaine de validité, mais la difficulté de prédire la limite de la zone 3 rend ceci actuellement impossible. Seule une validation expérimentale permet de donner cette limite.

b. Vitesse de coupe :

Les paramètres de rugosité sont théoriquement indépendants de la vitesse de coupe (modèle géométrique). Cependant, dans la pratique, cette indépendance est conditionnée par la présence de l'arête rapportée pour les basses vitesses de coupe. Une série d'essais expérimentaux permet de se rendre compte de cet état de fait (figure IV.5).

Matière usinée : C35-HB 180. Outil : carbure P15. Conditions de coupe : $a_p = 1,1\text{mm}$
 $f = 0,1\text{m/tr}$.

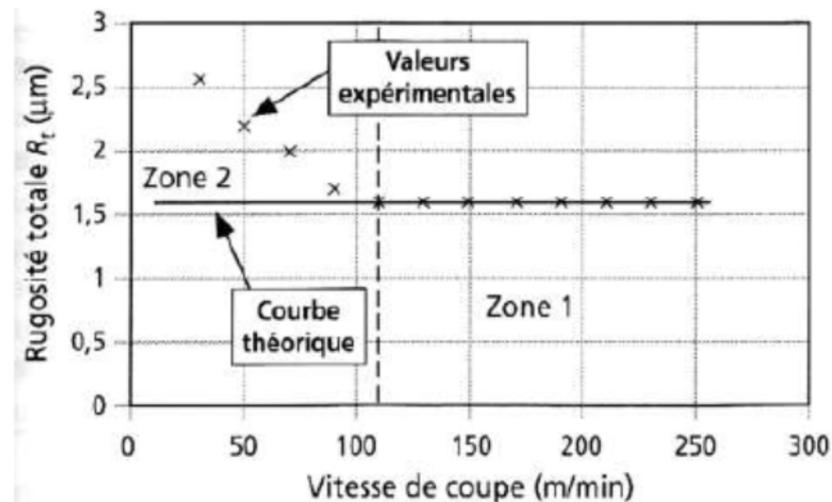


Figure IV.5 : Evolution de la rugosité totale en fonction de la vitesse de coupe en chariotage.

Zone 1 : la vitesse de coupe (V_c) n'a aucune influence sur la rugosité. Le modèle géométrique est applicable.

Zone 2 : dans cette zone à basse vitesse de coupe, la valeur des paramètres de rugosité croît.

Cette augmentation est due à l'effet cumulé de l'apparition d'une arête rapportée et des phénomènes d'arrachement.

En conclusion, la plage d'utilisation normale de l'outil conduit nécessairement à éviter l'arête rapportée.

On considère donc couramment que V_c n'a pas d'influence sur l'état de surface.

C'est pour cette raison que les modèles de R_t et R_a ne prennent pas en compte V_c . Il demeure néanmoins des applications où il n'est pas possible d'éviter de faibles vitesses de coupe. C'est le cas notamment des opérations de dressage qui conduisent à des états de surface critiques au centre des pièces.

c. Profondeur de passe

Théoriquement la rugosité est indépendante de la profondeur de passe. Cependant, il apparaît qu'aux faibles profondeurs de passe, utilisées en finition, une influence non linéaire peut apparaître. Pour s'en rendre compte, une série d'essais peut être réalisée en faisant varier a_p (figure IV.6).

Matière usinée : C35-HB 180. Outil : carbure P15. Conditions de coupe : $V_c = 120\text{m/min}$ $f = 0,1\text{m/min}$

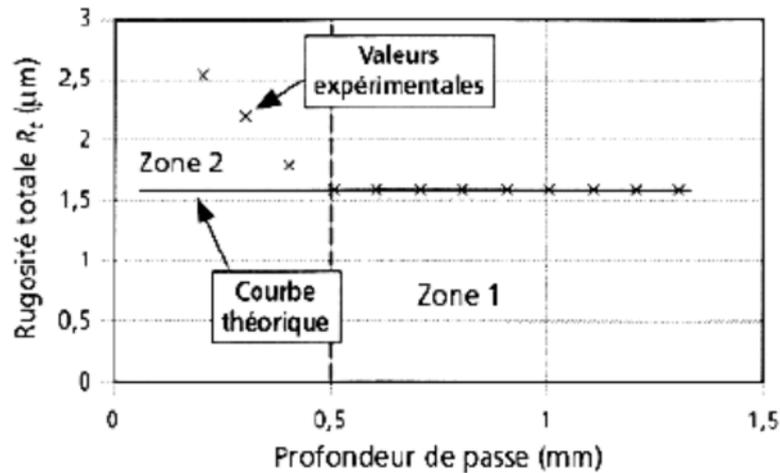


Figure IV.6 : Evolution de la rugosité totale en fonction de la profondeur de passe en chariotage.

Zone 1 : a_p n'a aucune influence sur les paramètres de rugosité.

Zone 2 : dans cette zone à faibles profondeurs de passe, la valeur des paramètres de rugosité croît.

L'épaisseur nominale de coupe devient localement très faible. L'outil ne coupe plus, des vibrations apparaissent, les écarts de quatrième ordre deviennent importants.

Si on augmente la vitesse de coupe, la zone 2 rétrécit et la coupe se passe mieux du fait du comportement viscoplastique du matériau. Cela explique notamment l'intérêt d'usiner à des vitesses de coupe très élevées en finition, afin de retrouver une épaisseur de coupe compatible à la fois avec les exigences de précisions dimensionnelles et avec les caractéristiques de formation du copeau sur un outil de géométrie d'arête donnée.

7. Influence de la géométrie de l'outil :

a. Le rayon de bec

Pour étudier l'influence réelle du rayon de bec sur les paramètres de rugosité, usinons un ensemble de cylindres. Chaque cylindre est usiné avec une plaquette ayant un rayon de bec r_e différent (de 0,4 mm à 1,6 mm) (figure IV.7).

Matière usinée : C35-HB 180. Outil : carbure P15. Conditions de coupe : $V_c=120\text{m/min}$
 $f=0,1\text{m/min}$. $a_p=1,1\text{mm}$.

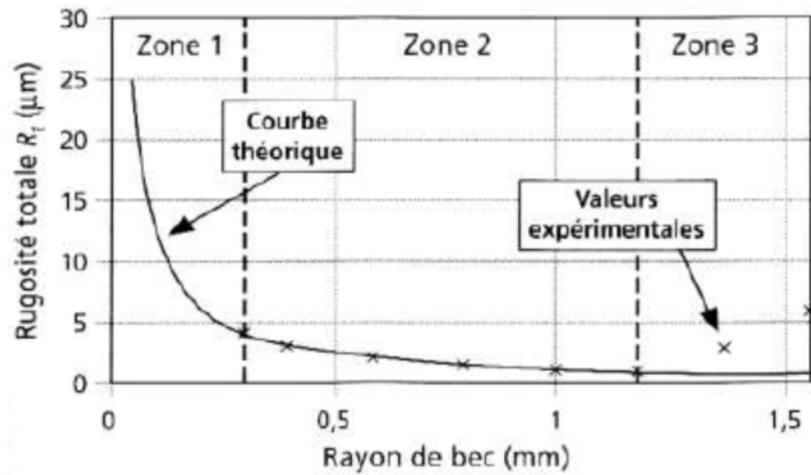


Figure IV.7 : Evolution de la rugosité totale en fonction du rayon de bec en chariotage.

Zone 1 : pour un rayon de bec petit ($r_e < 0,4$ mm), aucune conclusion ne peut être tirée, car on ne peut pas comparer avec le modèle géométrique du fait de l'absence d'outils avec faibles rayons.

Zone 2 : les résultats sont en accord avec le modèle géométrique.

Zone 3 : les valeurs des paramètres de rugosité augmentent. Les résultats expérimentaux s'éloignent des valeurs données par le modèle (figure IV.8). À avance constante, l'épaisseur locale du copeau diminue lorsque r_e augmente. L'outil ne coupe plus aussi bien et arrache la matière de la pièce. Les écarts du quatrième ordre deviennent très importants, l'hypothèse du modèle n'est plus vérifiée. En effet, l'épaisseur des copeaux devenant très faible, un refus de coupe locale peut apparaître (copeau minimal).

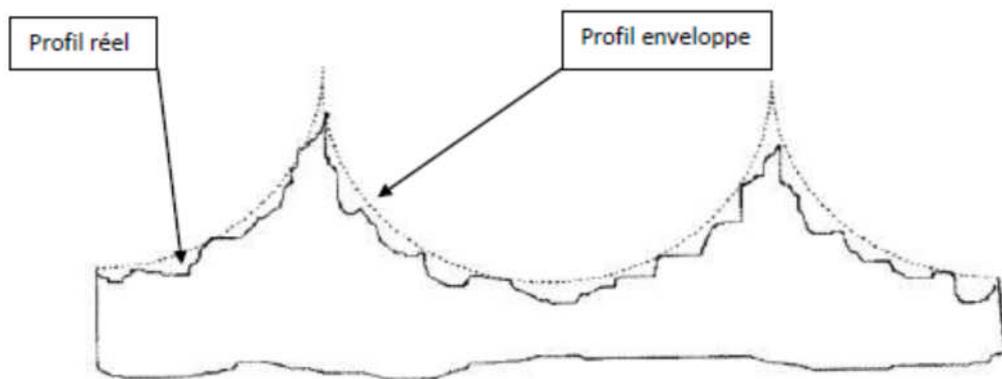


Figure IV.8 : Illustration de l'écart entre le profil réel et le profil enveloppe dû à des phénomènes d'arrachement.

L'étude de cette zone 3 est fonction de la qualité de l'acuité de l'arête principale de coupe, de son stade d'usure V_{BB} , de la vitesse de coupe V_c , et de l'avance f choisie. Si on augmente V_c ou f , la coupe se fait dans de meilleures conditions ce qui implique que R_t diminue. Cela s'explique notamment par l'augmentation de l'épaisseur locale des copeaux avec l'avance au de là d'une valeur critique, mais aussi par le comportement viscoplastique du matériau.

L'épaisseur du copeau minimum diminue.

b. Influence du niveau de l'usure de l'outil

La valeur des paramètres de rugosité peut augmenter en fonction du temps effectif de coupe.

C'est pour cela qu'une valeur limite des paramètres de rugosité peut être prise comme indicateur d'usure des outils de coupe. La figure IV.9 donne un exemple de l'évolution de R_t au cours de l'usinage.

Matière usinée : C35-HB 180. Outil : carbure P15. Conditions de coupe : $V_c=120\text{m/min}$

$f=0,1\text{m/min}$. $a_p=1,1\text{mm}$. $R=0,8\text{mm}$

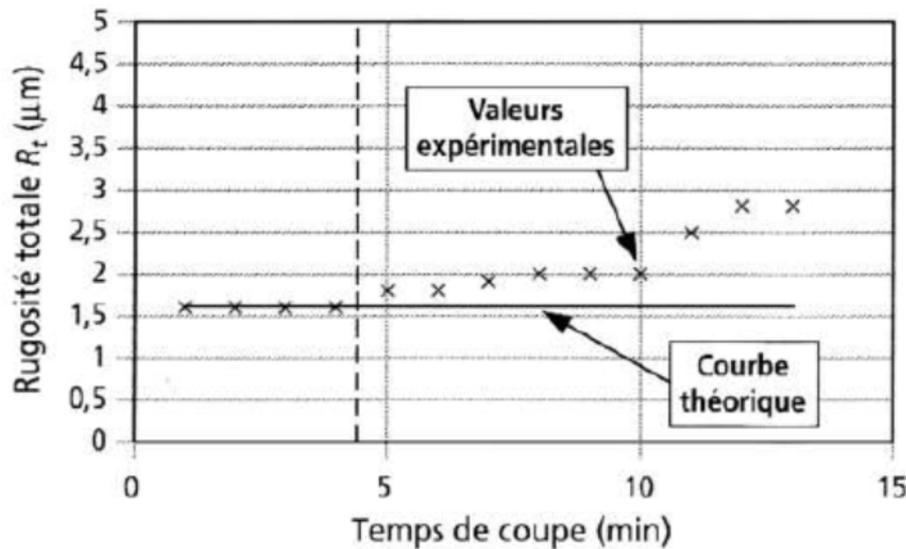


Figure IV.9 : Evolution de la rugosité totale en fonction de la durée d'usinage en chariotage.

Ce procédé de surveillance d'usure de l'outil est parfois utilisé pour les fabrications en grande série, pour lesquelles on peut se permettre de contrôler la rugosité de chaque pièce entre deux postes. Un critère limite de rugosité fixé à l'avance signalera la détérioration de l'outil. Dans le cas de la petite série, on se reposera sur la compétence de l'opérateur et sur son suivi visuel ou tactile de l'état de surface pour déclarer la détérioration de l'outil.

8. Relation entre la rugosité de la pièce, l'usure de l'outil et le régime de coupe :

Les figures IV.10 a et b traduisent les résultats expérimentaux observés dans ce but. On aura une image beaucoup plus nette et explicite de la fonction $R_{\max}=f(h_a, v, f)$ avec les représentations spatiales données (figure IV.11 a et b).

La première (figure III.11 a) montre qu'à toute vitesse de coupe, $R_{\max}=f(h_a)$ conserve la même allure générale tout en ayant, aux faibles vitesses de coupe, une variation plus ascendante. On peut en déduire que le critère d'usure devant assurer une rugosité limite R_{\max} donnée dépend de la vitesse de coupe : plus la vitesse est grande, et plus l'usure pourra être accentuée avant d'atteindre la rugosité prévue pour la surface usinée.

Parallèlement, comme l'indiquent les figures IV.10 b et IV.11 b, R_{\max} garde aussi la même allure générale en fonction de h_a lorsque l'avance varie, avec une plus grande influence aux avances réduites. En effet, la

diminution de l'avance réduit l'épaisseur du copeau, et le contacte outil-pièce s'établit le long de la partie curviligne du tranchant ; l'épaisseur du métal comprimé augmente ainsi que les déformations plastiques. Cet effet est irréversible : il progresse avec l'usure de l'outil, qui ne peut qu'agrandir le rayon d'affutage et donc entraîner toutes les conséquences néfastes qui en découlent pour la rugosité de la pièce, comme cela a été exposé au paragraphe précédent. En confirmation de ces résultats il a été établi que la pression et le travail spécifiques de coupe croissent intensément avec la largeur de la facette d'usure et lorsque l'épaisseur du copeau diminue.

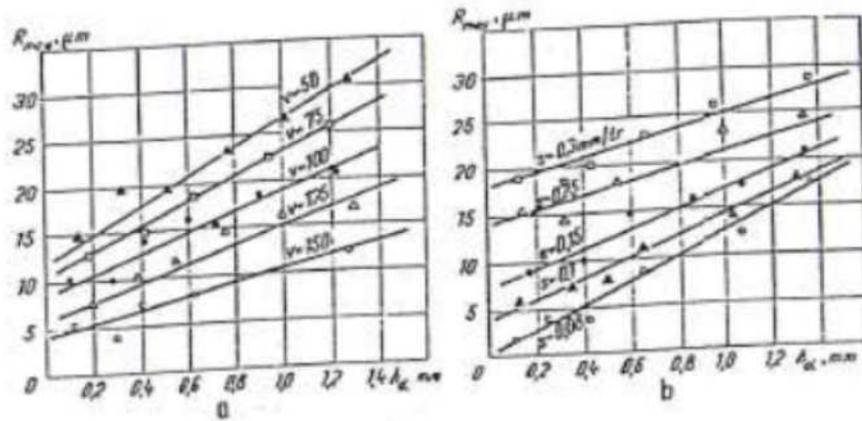


Figure IV.10 : influence de la face en dépouille sur la rugosité de la surface tournée à différents régimes de coupe.

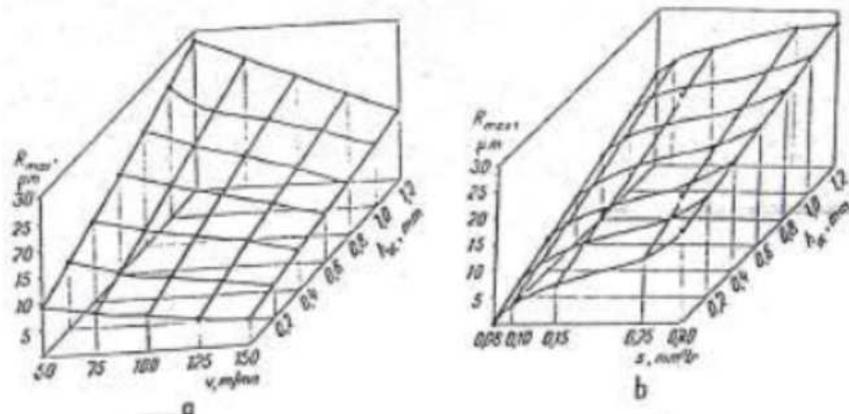


Figure IV.11 : représentation spatiale de la fonction $R_{max}=f(h_a, v, f)$.

9. Influence des fluides de coupe

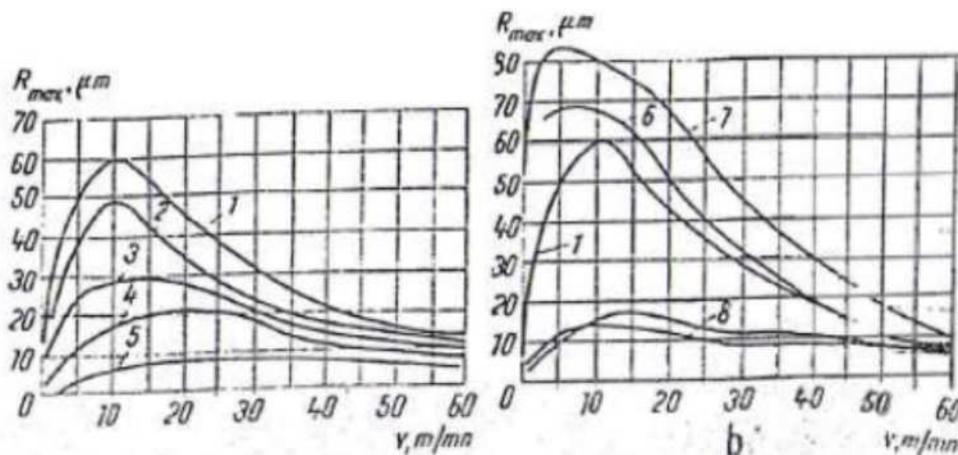
L'influence des fluides de coupe se traduit par une amélioration de la rugosité par le refroidissement et la lubrification qu'assurent ces fluides (tableau IV.1) ; en même temps on assiste à un écrouissage supplémentaire des couches superficielles du matériau travaillé (figure IV.12).

La figure amène les commentaires qui suivent :

- Diminution nette de la rugosité par rapport à l'usinage à sec, tout particulièrement avec des fluides activés maintenant les déformations plastiques à des niveaux relativement bas, réduisant les efforts de coupe et de frottement, la température, et prévenant la formation de l'arête rapportée.
- Si l'on crée une atmosphère neutre autour de la coupe (azote liquide, hydrogène gazeux), la rugosité augmente : ce mode de travail favorise considérablement la formation de l'arête rapportée. Des états de surface remarquables ont été obtenus par refroidissement à l'oxygène ; la formation de pellicules d'oxydes métalliques entraîne une diminution spectaculaire des frottements et des déformations plastiques. C'est par cet artifice que l'on obtient les rugosités les plus faibles
- Au-delà d'une vitesse de 60 m/mn, les divers fluides ont une efficacité dérisoire.

Liquides de refroidissement et de graissage	Coefficient correcteur K			
	Vitesse de coupe m/mn			
	20	60	90	150
Emulsion	0.92	0.96	0.98	1.0
Huile de machine	1.03	0.98	0.99	1.0
Pétrole lampant	0.89	0.95	0.98	1.0
Térébenthine	0.9	0.96	0.97	1.0
Solution aqueuse à 0.5% de soude	0.8	0.9	0.95	1.0
Solution aqueuse à 0.5% de soude et 1% de savon	0.7	0.85	0.95	1.0
Solution aqueuse à 0.5% de soude et 0.1% de savon	0.75	0.8	0.9	1.0

Tableau IV.1 : Exemples de liquides de coupe et leurs coefficients correcteurs.



1-air 2-huile légère 3-pétrole sulfoné 4-pétrole lampant 5-CCI 6-hydrogène 7-azote liquide 8-oxygène

Figure IV.12 : influence des fluides de coupe sur les états de surface en chariotage.

10. Influence de la rigidité de la machine-outil :

Une bonne rigidité de la machine-outil est évidemment une condition indispensable pour l'obtention d'une qualité de surface des pièces satisfaisantes. Les vibrations éventuelles et le broutage vont se traduire essentiellement par des défauts du second ordre (ondulation).

Des recherches expérimentales récentes, ont montré qu'aux faibles vitesses de coupe ($V_c = 25\text{m/mn}$), les hauteurs d'aspérités diminuent de 30% lorsqu'on fait croître la rigidité de 900 à 4500 Kgf/mm (daN/mm). Au-delà de ce régime, la rigidité perd de son importance ; il est remarquable cependant que pour $V_c \geq 75\text{m/mn}$, la hauteur réelle des aspérités se rapproche de la valeur théorique calculée R_c . La variation de rugosité citée précédemment est due aux vibrations nées du processus de coupe, en particulier à cause du copeau adhérent dont l'évacuation périodique s'effectue suivant la vitesse et l'avance, entre $V_c = 20\text{m/mn}$ et $V_c = 100$ à 150m/mn avec une fréquence de rupture allant de 1000 à 15000 à la minute ; il se produit des oscillations forcées à basse fréquence et amplitude élevée. Aux grandes vitesses, alors que le copeau adhérent n'a plus lieu de se former, d'autres phénomènes vibratoires apparaissent : ils'agit d'oscillations auto-entretenues du système matériel outil/pièce/machine à fréquence élevée (environ 500000 oscillations à la minute) et de faible amplitude.

La figure IV.13 reproduit la variation des hauteurs d'aspérités en fonction de la rigidité allouée à la machine.

Courbe 1 : faible rigidité.

Courbe 2 : grande rigidité.

Figure III.9	Avance (mm/tr)	Profondeur (mm)	Matériau
A	0.5	1	OLC45
b	0.12	0.5	OLC45

Tableau III.2 : Les valeurs prises pour l'expérimentation

Ils demeurent la cause principale des irrégularités longitudinales, par suite des variations de section de la couche usinée ; elles résultent des déplacements oscillatoires relatifs outil/pièce, d'où l'attention particulière qu'on leur accorde.

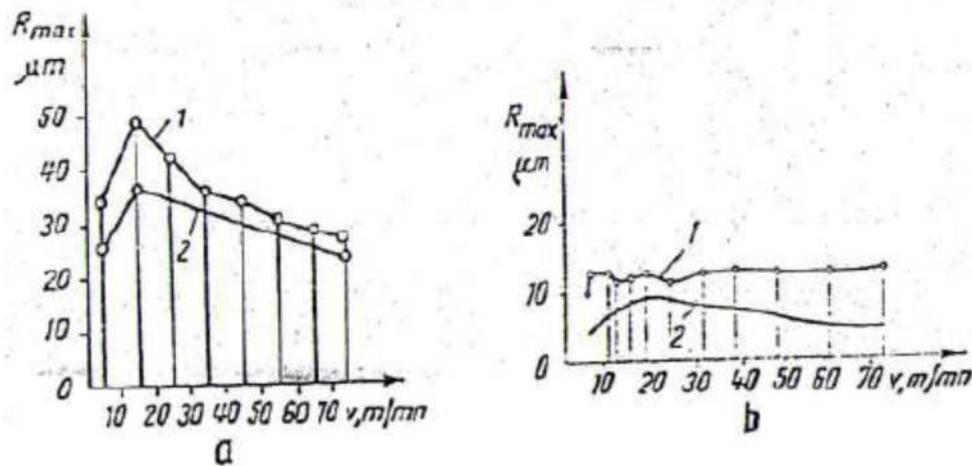


Figure IV.13 : influence de la rigidité de la machine sur la rugosité de la surface usinée.

Deux types de vibrations se produisent pendant la coupe des métaux :

- a) Oscillations entretenues
- b) Oscillations auto-entretenues ou auto-oscillations.

Les premières prennent naissance sous l'action d'une force périodique telle que (pour ne citer que les plus importantes).

- Effort variable agissent sur le système et résultant d'une coupe intermittente ;
- Forces d'inertie centrifuges dues aux masses non équilibrées en rotation ;
- Chocs provoqués par les défauts d'usinage existant sur les surfaces fonctionnelles chargées de transmettre les mouvements d'un organe à l'autre du mécanisme.

Les oscillations entretenues auront aussi pour origine les vibrations extérieures dues, par exemple, à d'autres machines voisines soumises à des chocs, tels que raboteuses, mortaiseuses fraiseuses.

Les deuxièmes (oscillations auto-entretenues) sont tributaires des modalités de formation des copeaux. A l'opposé des oscillations entretenues, elles sont caractérisées par l'absence des forces extérieures périodiques qui ne font pas intervenir la coupe proprement dite. Les causes principales en sont :

- Les forces de frottement du copeau en cours de dégagement et le frottement outil/pièce ;
- La résistance irrégulière offerte par l'épaisseur de la couche travaillée (hétérogénéité) ;
- Variations dimensionnelles de l'arête rapportée modifiant l'angle de coupe et, transversalement, l'aire de la section travaillée.

Plus les facteurs énumérés précédemment changeront brutalement, plus les forces génératrices de vibrations seront grandes et, avec elles, la rugosité de la pièce.

La vitesse de coupe ainsi que la profondeur de passe ont une grande influence sur les vibrations. À vitesse croissante, les vibrations commencent par s'intensifier pour diminuer ensuite.

L'avance agit de façon plus discrète ; lorsqu'elle croît, les vibrations décroissent.

En conclusion, plus la machine-outil est rigide et plus les jeux entre les mécanismes sont faibles, plus les possibilités d'apparition des vibrations sont éliminées.

11. Conclusion :

Ce chapitre, donne un aperçu général sur les différents paramètres qui influent sur la qualité de l'état de surface, la manière dont ils agissent et leurs importances en vue d'obtenir une bonne qualité d'état de surface. Tout ça pour dire que pour avoir une bonne qualité d'état de surface d'une pièce mécanique, il faut trouver la bonne combinaison entre ces paramètres lors de l'étude de cette dernière.

CHAPITRE V

Experimentation



1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique afin de caractériser l'influence des paramètres de coupe sur la qualité de l'état de surface. Ce chapitre consiste à présenter le matériel qui sert aux mesures des états de surfaces des pièces usinées à l'aide des moyens existants (rugosimètre) et à la représentation et discussions de ces résultats pour démontrer l'influence des paramètres de coupe sur la qualité de l'état de surface.

2. Présentation du matériel

a. Machine d'essai

Le tour parallèle **PMO semi-automatique** type **920-9201** de puissance à la broche 6,5 KW a une gamme de vitesses comprise entre 31,5 et 1400 tr/min et une gamme d'avance en chariotage entre 0.05 et 0.186 mm/tr, et il est adapté aux essais de laboratoire avec la mise en place d'un variateur de vitesse couplé à un moteur à courant continu pour contrôler la vitesse de rotation de la broche au moyen d'un tachymètre.

L'utilisation d'un comparateur au début de chaque essai permis d'identifier des vibrations, due à la réaction du sol et l'état de la machine .

Cette observation a amené à réaliser une isolation du tour par rapport au sol avec des supports métalliques qui dissipent l'énergie par friction.

Cette isolation permet d'avoir une machine utilisable pour nos essais. Cette amélioration a été confirmée par une étude postérieure du comportement dynamique de la machine. (FigureV.1)



Figure V.1 : machine d'essai.

b. Outil et porte-outil utilisés

Pour réaliser nos expériences on a utilisé un outil à plaquette. Selon un catalogue consulté au niveau de l'atelier de notre faculté on a choisi la plaquette monobloc du type **GC4235** c'est une plaquette carrée en carbure métallique **P35** de rayon de bec =1.2 mm, qui se montre sur un porte-plaquette qui utilise un ensemble bride vise pour fixer la plaquette. (Figure V.2.a, b et c).



Figure V.2.a : plaquette utilisée.



Figure V.2.b bride-vise de fixation.



Figure V.2.c : plaquette montée sur porte outil utilisé.

c. Instruments de mesure

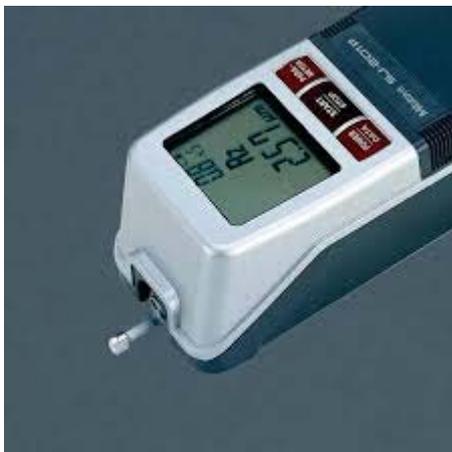
Pour mesurer les diamètres des pièces utilisées et les longueurs des éprouvettes d'essais, nous avons utilisé un pied à coulisse. Il permet une mesure dont **la précision** varie avec le type de vernier utilisé. Le vernier peut être au **1/10**, au **1/20**, au **1/50**. Il permet donc d'évaluer une mesure au 1/10 de mm (0,01mm), au 1/20 de mm (0,05 mm), et au **1/50 de mm (0,02 mm)**. En mécanique, le vernier au **1/50ème** est le plus utilisé. (Figure V.3).



Figure V.3 : pied à coulisse utilisé.

Et pour la mesure de la rugosité des surfaces usinées (éprouvettes), nous avons utilisé un rugosimètre **surf test** de type **SJ-201** (figure V.4.1), qui présente les caractéristiques suivantes:

- 4 paramètres calculés : Ra, Rz, Ry, Rq.
- Détecteur par système inductif.
- Etalonnage automatique (figure V.4.2).
- Fonction Bon / Mauvais.
- Alimentation : batterie ou secteur.
- Mesures plates



FigureV.4.1: rugosimètre SJ201.



FigureV.4.2: Etalonnage automatique.

d. Principe de mesure des états de surface du SJ201 :

Un palpeur (stylet) installé sur l'unité de détection du SJ20, permet de détecter des irrégularités infimes présentes sur la surface d'une pièce.

Lors de l'opération de palpement, le déplacement vertical du stylet est analysé et les résultats obtenus sont affichés sur l'écran à cristaux liquides du SJ201

e. Matière première

En ce qui concerne la matière première utilisée pour nos essais, nous avons pris deux types de matériaux, pour chaque matériau on a utilisé trois (3) barres. L'aluminium ordinaire sous forme de barre moulée (400X50 mm) de **HB=90 Mpa** et l'acier XC45 sous forme de barre laminée (400X50mm), cet Acier de **HB= 220Mpa** est mi-dur de haute qualité pouvant être utilisé à l'état traité ou recuit ou à l'état trempé superficiellement.

3. Préparation des éprouvettes d'essais

Les essais sont effectués en chariotage sur des éprouvettes cylindriques usinées sur les barres présentes précédemment. Dans chaque barre on usine six (6) éprouvettes de dimensions (30X40 mm) (Figure V.5) à l'aide d'un outil à gorger (Figure V.6).



Figure V.5 : Préparation des éprouvettes d'essais



Figure V.6 : outil à gorger

Pour réduire les éprouvettes d'essais au diamètre désiré, nous avons utilisé un outil à charioter à plaquette triangulaire en carbure métallique revêtu du type GC 4035, qui est un outil robuste et résistant aux chocs. Il est destiné aux opérations d'ébauches. (Figure V.7).



Figure V.7 : outil à charioter utilisé pour l'ébauche.

4. Plan des expériences

Dans cette partie, nous allons faire plusieurs expériences. On fera à chaque fois varier un paramètre tout en fixant les autres (tableau V.1).

N° de l'expérience	Matériau	Vc	fc	Pc	Lubrifiant
1	Aluminium	Variable	Constant	Constant	Oui
2	Aluminium	Constant	Variable	Constant	Oui
3	Aluminium	Constant	Constant	Variable	Oui
4	Acier	Variable	Constant	Constant	Oui
5	Acier	Constant	Variable	Constant	Oui
6	Acier	Constant	Constant	Variable	Oui

Tableau V.1 : plan des expériences.

La variation de chaque paramètre se fait on lui donnant 6 valeurs comme il est montré dans le tableau ci-dessous :

Paramètre	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3	Valeur 4	Valeur 5	Valeur 6
Vc	31 m/min	44 m/min	62 m/min	88 m/min	124m/min	173 m/min
fc	0.08mm/tr	0.16mm/tr	0.2mm/tr	0.32mm/tr	0.4mm/tr	0.8mm/tr
Pc	0.25 mm	0.5 mm	0.75 mm	1 mm	1.25 mm	1.5 mm

Tableau V.2 : variation des paramètres.

a. Variation de Vc sur les éprouvettes d'aluminium

Dans cette première expérience, nous allons voir l'influence de la vitesse de coupe sur la qualité de l'état de surface. Pour cela, nous usinerons en chariotage une barre en aluminium ordinaire moulée qui comporte six (6) éprouvettes (voir figure IV.9). Nous ferons varier pour chaque éprouvette la vitesse de coupe tout en fixant la profondeur et l'avance de coupe.

Conditions de coupe choisies

$P_c = 1 \text{ mm}$. (Constante)

$f_c = 0.09 \text{ mm/tr}$. (Constante)

$\phi.N^{\circ 1} = \phi.N^{\circ 2} = \phi.N^{\circ 3} = \phi.N^{\circ 4} = \phi.N^{\circ 5} = \phi.N^{\circ 6} = 40 \text{ mm}$

$L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = L_6 = 30 \text{ mm}$

Valeurs de la vitesse de coupe

$$N_1 = 250 \text{ tr/min} \implies V_{c1} = \frac{\pi D_1 N_1}{1000} = 31 \text{ m/min.} \quad \text{Appliquer sur le diamètre N}^{\circ}1.$$

$$N_2 = 355 \text{ tr/min} \implies V_{c2} = \frac{\pi D_2 N_2}{1000} = 44 \text{ m/min.} \quad \text{Appliquer sur le diamètre N}^{\circ}2.$$

$$N_3 = 500 \text{ tr/min} \implies V_{c3} = \frac{\pi D_3 N_3}{1000} = 62 \text{ m/min.} \quad \text{Appliquer sur le diamètre N}^{\circ}3.$$

$$N_4 = 710 \text{ tr/min} \implies V_{c4} = \frac{\pi D_4 N_4}{1000} = 88 \text{ m/min.} \quad \text{Appliquer sur le diamètre N}^{\circ}4.$$

$$N_5 = 1000 \text{ tr/min} \implies V_{c5} = \frac{\pi D_5 N_5}{1000} = 124 \text{ m/min.} \quad \text{Appliquer sur le diamètre N}^{\circ}5.$$

$$N_6 = 1400 \text{ tr/min} \implies V_{c6} = \frac{\pi D_6 N_6}{1000} = 173 \text{ m/min.} \quad \text{Appliquer sur le diamètre N}^{\circ}6.$$

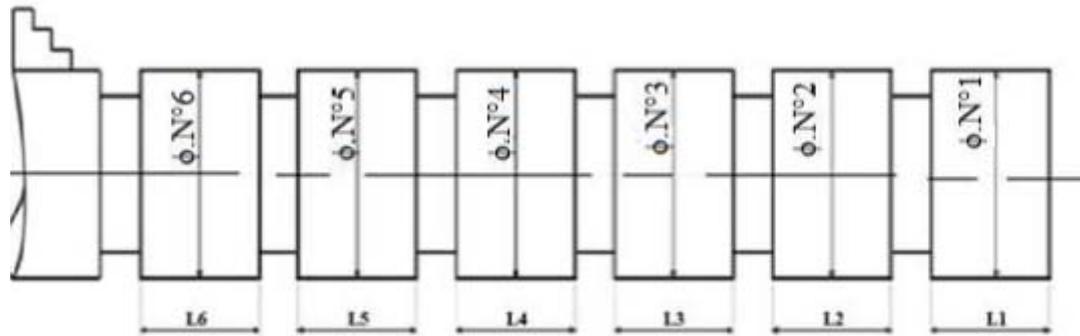


Figure V.8 : éprouvettes d'essais.

Pour faire l'usinage, on a monté la barre en utilisant un montage mixte (mandrin + contre Pointe tournante). Après avoir fait l'usinage des six (6) éprouvettes avec de différentes vitesses de coupe, on a pris les mesures de l'état de surface de chaque éprouvette à l'aide du rugosimètre. Les valeurs obtenues pour chaque essai sont rapportées dans le tableau suivant :

N° diamètre	N (tr/min)	Vc (m/min)	Ra (μm)	Rz (μm)
Ø.N°1	250	31	3,01	13,54
Ø.N°2	355	44	2,08	11,71
Ø.N°3	500	62	1,72	8,67
Ø.N°4	710	88	1,09	5,98
Ø.N°5	1000	124	1,01	5,64
Ø.N°6	1400	173	0,85	4,81

Tableau V.3 : résultats des mesures de la rugosité des éprouvettes d'aluminium Pour la variation de Vc.

Les résultats obtenus dans le tableau présenté ci-dessus sont représentés sous forme de courbes dans le graphe suivant :

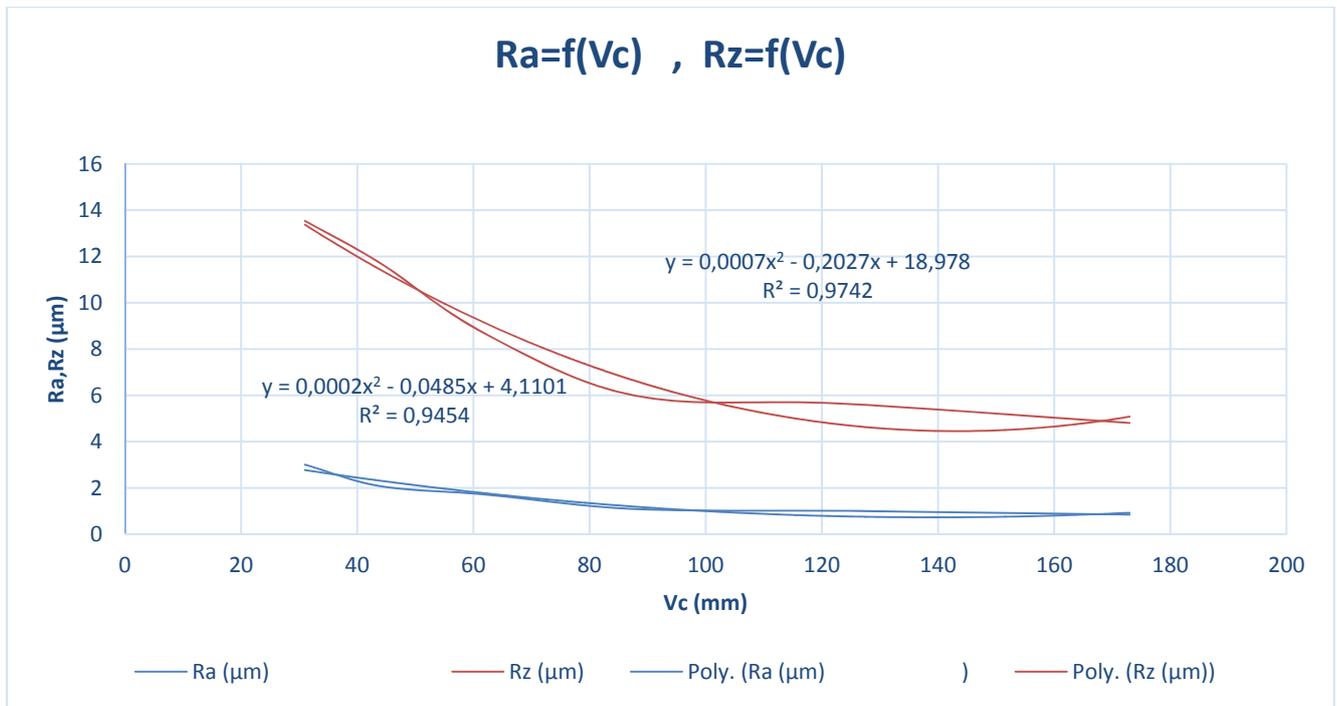


Figure V.9 : représentation graphique de $Rz=f(Vc)$ et $Ra=f(Vc)$ pour l'aluminium.

Les deux courbes représentent respectivement $Rz=f(Vc)$ et $Ra=f(Vc)$. On constate que pour les deux courbes Ra et Rz, plus la vitesse de coupe augmente, plus la rugosité diminue, donc la qualité de l'état de surface s'améliore.

b. Variation de f_c sur l'éprouvette d'aluminium

Dans cette expérience, nous allons voir l'influence de l'avance de coupe sur la qualité de l'état de surface. Pour cela, nous usinerons en chariotage et à sec une barre en aluminium ordinaire moulée qui comporte six (6) éprouvettes (figure V.10). Nous ferons varier pour chaque éprouvette l'avance de coupe tout en fixant la profondeur et la vitesse de coupe.

Conditions de coupe

$P_c = 1$ mm. (Constante)

$V_c = 89$ m/min. (Constante)

$\phi.N^{\circ}1 = \phi.N^{\circ}2 = \phi.N^{\circ}3 = \phi.N^{\circ}4 = \phi.N^{\circ}5 = \phi.N^{\circ}6 = 40$ mm.

$L1 = L2 = L3 = L4 = L5 = L6 = 30$ mm.

Valeurs de l'avance de coupe

Fc1 = 0.08 mm/tr. Appliquer sur le diamètre N°1.

Fc2 = 0.16 mm/tr. Appliquer sur le diamètre N°2.

Fc3 = 0.2 mm/tr. Appliquer sur le diamètre N°3.

Fc4 = 0.32 mm/tr. Appliquer sur le diamètre N°4.

Fc5 = 0.4 mm/tr. Appliquer sur le diamètre N°5.

Fc6 = 0.8 mm/tr. Appliquer sur le diamètre N°6.

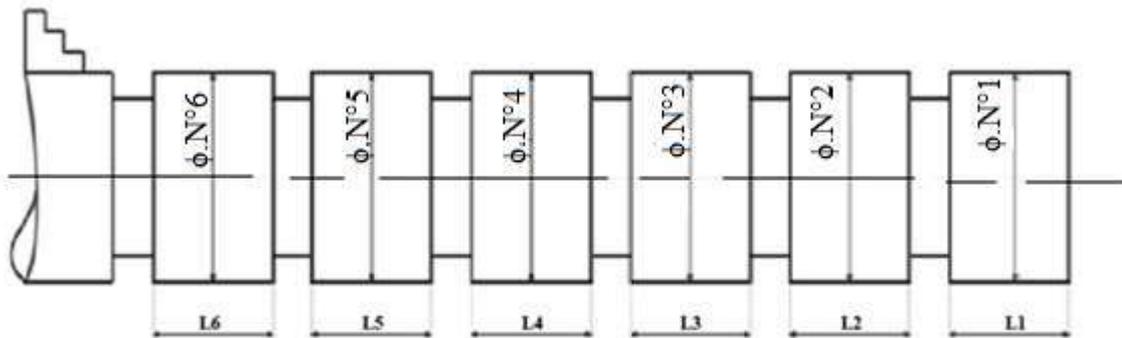


Figure V.10 : épreuves d'essais

Pour faire l'usinage, on a utilisé le même montage mixte (mandrin + contre pointe tournante).

Après avoir fait l'usinage des six (6) éprouvettes avec de différentes avances de coupe, on a pris les mesures de l'état de surface de chaque éprouvette à l'aide du rugosimètre. Les valeurs obtenues pour chaque essai sont rapportées dans le tableau suivant :

N° diamètre	fc (mm/tr)	Ra (µm)	Rz (µm)
Ø.N°1	0,08	3	11,85
Ø.N°2	0,16	3,24	14,6
Ø.N°3	0,2	4,85	21,77
Ø.N°4	0,32	6,68	26,3
Ø.N°5	0,4	8,18	33,21
Ø.N°6	0,8	10,25	34,45

Tableau V.4 : résultats des mesures de la rugosité des éprouvettes d'aluminium Pour la variation de fc

Les résultats obtenus dans le tableau présenté ci-dessus sont représentés sous forme de courbes dans le graphe suivant :

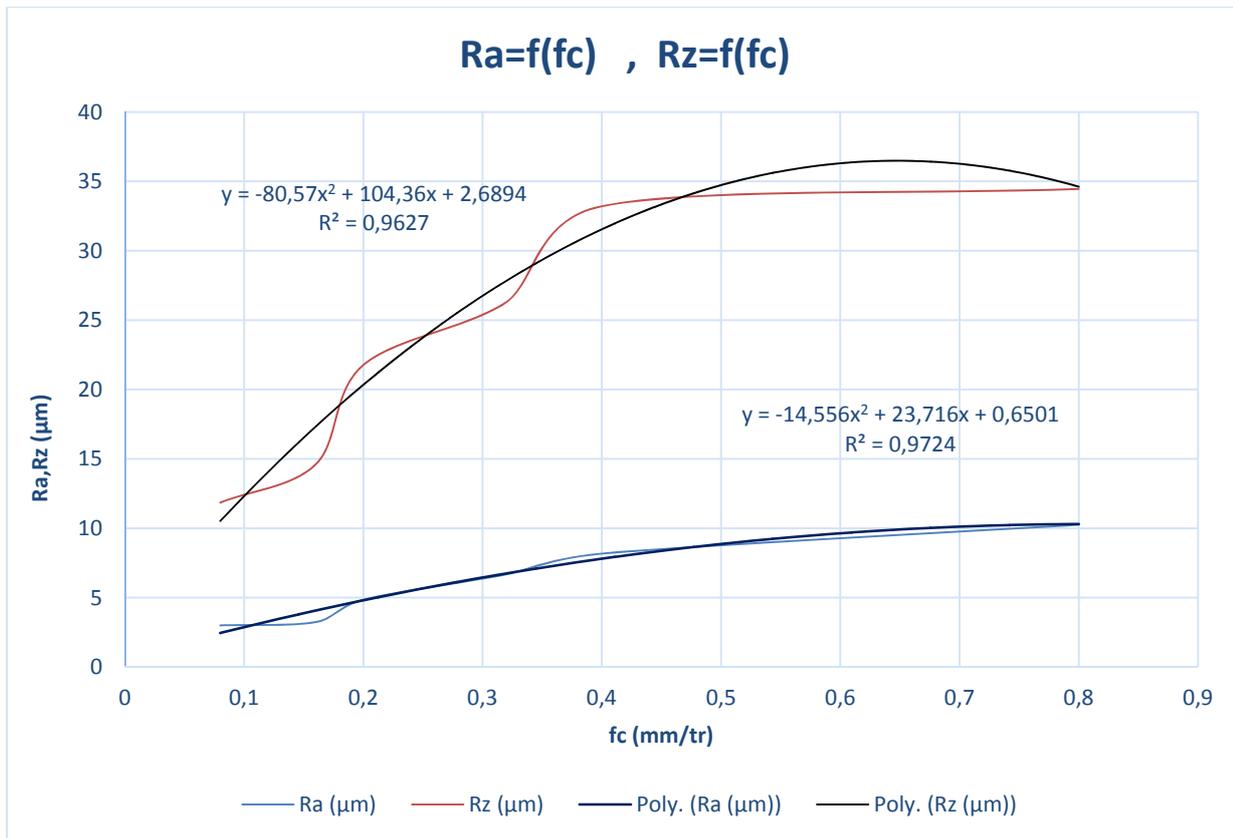


Figure V.11 : représentation graphique de $Rz=f(fc)$ et $Ra=f(fc)$ pour l'aluminium

Les deux courbes représentent respectivement $Rz=f(fc)$ et $Ra=f(fc)$. On constate que pour les deux courbes Ra et Rz, plus l'avance de coupe augmente, plus la rugosité augmente, donc la qualité de l'état de surface se détériore.

c. Variation de Pc sur l'éprouvette d'aluminium

Dans cette expérience, nous allons voir l'influence de la profondeur de coupe sur la qualité de l'état de surface. Pour cela, nous usinerons en chariotage et à sec une barre en aluminium ordinaire moulée qui comporte six (6) éprouvettes (figure V.12). Nous ferons varier pour chaque éprouvette la profondeur de coupe Pc tout en fixant la vitesse et l'avance de coupe.

Conditions de coupe

$$fc = 0.09 \text{ mm/tr.}$$

$$Vc = 89 \text{ m/min.}$$

$$\phi.N^{\circ}1 = \phi.N^{\circ}2 = \phi.N^{\circ}3 = \phi.N^{\circ}4 = \phi.N^{\circ}5 = \phi.N^{\circ}6 = 40 \text{ mm.}$$

$$L1 = L2 = L3 = L4 = L5 = L6 = 30 \text{ mm.}$$

Valeurs de la profondeur de coupe

Pc1= 0.25 mm. Appliquer sur le diamètre N°1.

Pc2= 0.5 mm. Appliquer sur le diamètre N°2.

Pc3= 0.75 mm. Appliquer sur le diamètre N°3.

Pc4 = 1 mm. Appliquer sur le diamètre N°4.

Pc5 = 1.25 mm. Appliquer sur le diamètre N°5.

Pc6 = 1.5 mm. Appliquer sur le diamètre N°6.

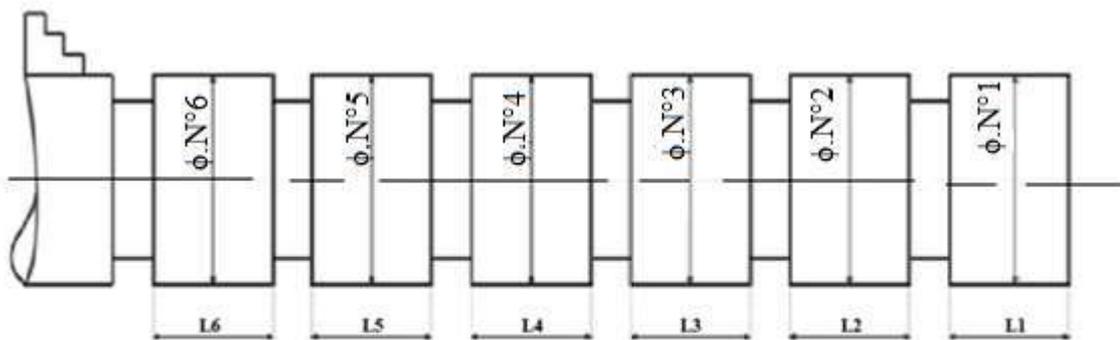


Figure V.12 : éprouvettes d'essais.

Pour faire l'usinage, on a utilisé le même montage mixte (mandrin + contre pointe tournante).

Après avoir fait l'usinage des six (6) éprouvettes avec de différentes profondeurs de coupe, on a pris les mesures de l'état de surface de chaque éprouvette à l'aide du rugosimètre. Les valeurs obtenues pour chaque essai sont rapportées dans le tableau suivant :

N° diamètre	Pc (mm)	Ra (µm)	Rz (µm)
Ø.N°1	0,25	1,36	7,51
Ø.N°2	0,5	1,83	9,06
Ø.N°3	0,75	2,18	9,98
Ø.N°4	1	2,4	11,39
Ø.N°5	1,25	3,03	12,45
Ø.N°6	1,5	3,28	13,29

Tableau V.5 : résultats des mesures de la rugosité des éprouvettes d'aluminium Pour la variation de Pc
Les résultats obtenus dans le tableau présenté ci-dessus sont représentés sous forme de courbes dans le graphe suivant :

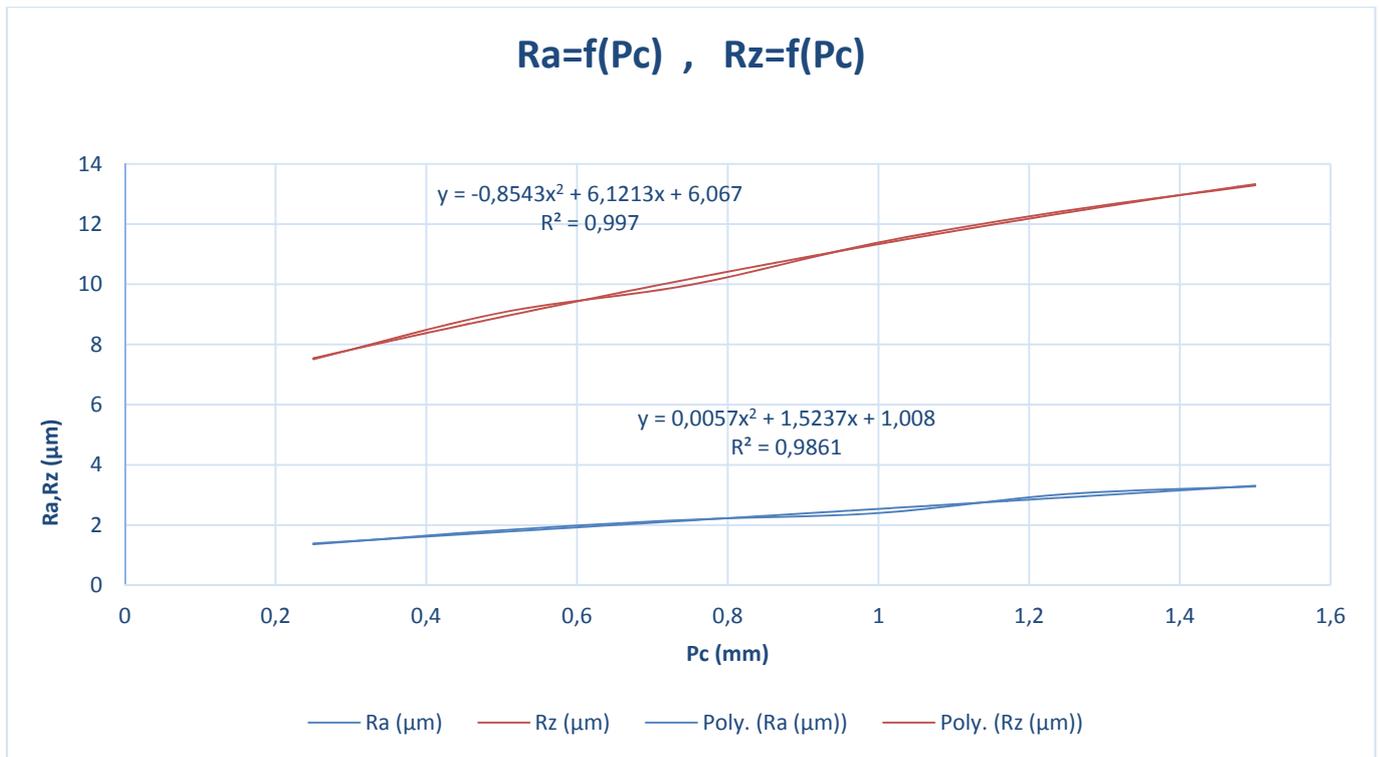


Figure V.13 : représentation graphique de $Rz=f(Pc)$ et $Ra=f(Pc)$ pour l'aluminium.

D'après cette figure, on constate que la courbe $Rz=f(Pc)$ reste plus ou moins constante (faible amélioration de la qualité). De même, la courbe $Ra=f(Pc)$ reste relativement constante (la différence est très faible).

d. Variation de V_c sur l'éprouvette d'acier XC45

Dans cette expérience, nous allons voir l'influence de la vitesse de coupe sur la qualité de l'état de surface. Pour cela, nous usinerons en chariotage et à sec une barre en acier XC45 laminée qui comporte six (6) éprouvettes (voir figure V.14). Nous ferons varier pour chaque éprouvette la vitesse de coupe V_c tout en fixant la profondeur et l'avance de coupe.

Conditions de coupe choisies

$p_c = 1$ mm. (Constante)

$f_c = 0.09$ mm/tr. (Constante)

$\phi.N^{\circ}1 = \phi.N^{\circ}2 = \phi.N^{\circ}3 = \phi.N^{\circ}4 = \phi.N^{\circ}5 = \phi.N^{\circ}6 = 40$ mm.

$L1 = L2 = L3 = L4 = L5 = L6 = 30$ mm.

Valeurs de la vitesse de coupe

$$\begin{aligned}
 N1= 250 \text{ tr/min} &\longrightarrow V_{c1} = \frac{\pi D1 N1}{1000} = 37 \text{ m/min.} && \text{Appliquer sur le diamètre N°1.} \\
 N2= 355 \text{ tr/min} &\longrightarrow V_{c2} = \frac{\pi D2 N2}{1000} = 52 \text{ m/min.} && \text{Appliquer sur le diamètre N°2.} \\
 N3= 500 \text{ tr/min} &\longrightarrow V_{c3} = \frac{\pi D3 N3}{1000} = 74 \text{ m/min.} && \text{Appliquer sur le diamètre N°3.} \\
 N4= 710 \text{ tr/min} &\longrightarrow V_{c4} = \frac{\pi D4 N4}{1000} = 105 \text{ m/min.} && \text{Appliquer sur le diamètre N°4.} \\
 N5= 1000 \text{ tr/min} &\longrightarrow V_{c5} = \frac{\pi D5 N5}{1000} = 148 \text{ m/min.} && \text{Appliquer sur le diamètre N°5.} \\
 N6= 1400 \text{ tr/min} &\longrightarrow V_{c6} = \frac{\pi D6 N6}{1000} = 207 \text{ m/min.} && \text{Appliquer sur le diamètre N°6.}
 \end{aligned}$$

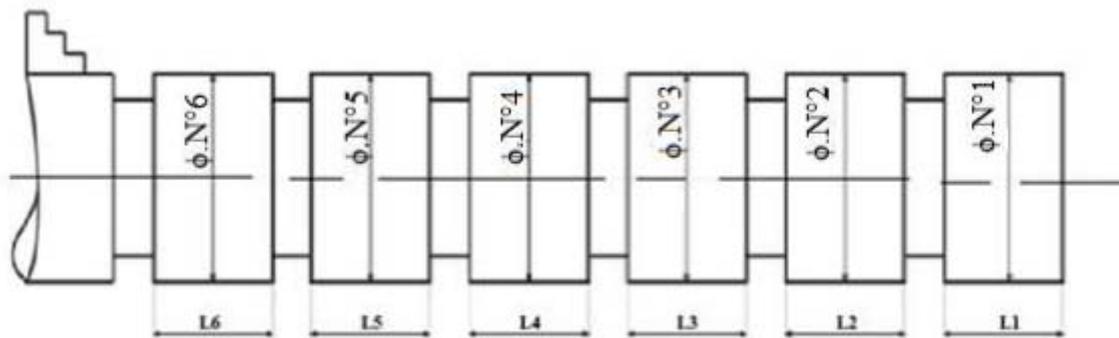


Figure V.14 : éprouvettes d’essais.

Pour faire l’usinage, on a monté la barre en utilisant un montage mixte (mandrin + contre pointe tournante). Après avoir fait l’usinage des six (6) éprouvettes avec de différentes vitesses de coupe, on a pris les mesures de l’état de surface de chaque éprouvette à l’aide du rugosimètre. Les valeurs obtenues pour chaque essai sont rapportées dans le tableau suivant :

N° diamètre	N (tr/min)	Vc (m/min)	Ra (µm)	Rz (µm)
Ø.N°1	250	31	5,1	24,18
Ø.N°2	355	44	5,04	23,4
Ø.N°3	500	62	4,41	18,61
Ø.N°4	710	88	4,04	15,6
Ø.N°5	1000	124	2,44	12,6
Ø.N°6	1400	173	1,6	7,86

Tableau V.6 : résultats des mesures de la rugosité des éprouvettes d’acier pour la variation de Vc

Les résultats obtenus dans le tableau présenté ci-dessus sont représentés sous forme de courbes dans le graphe suivant :

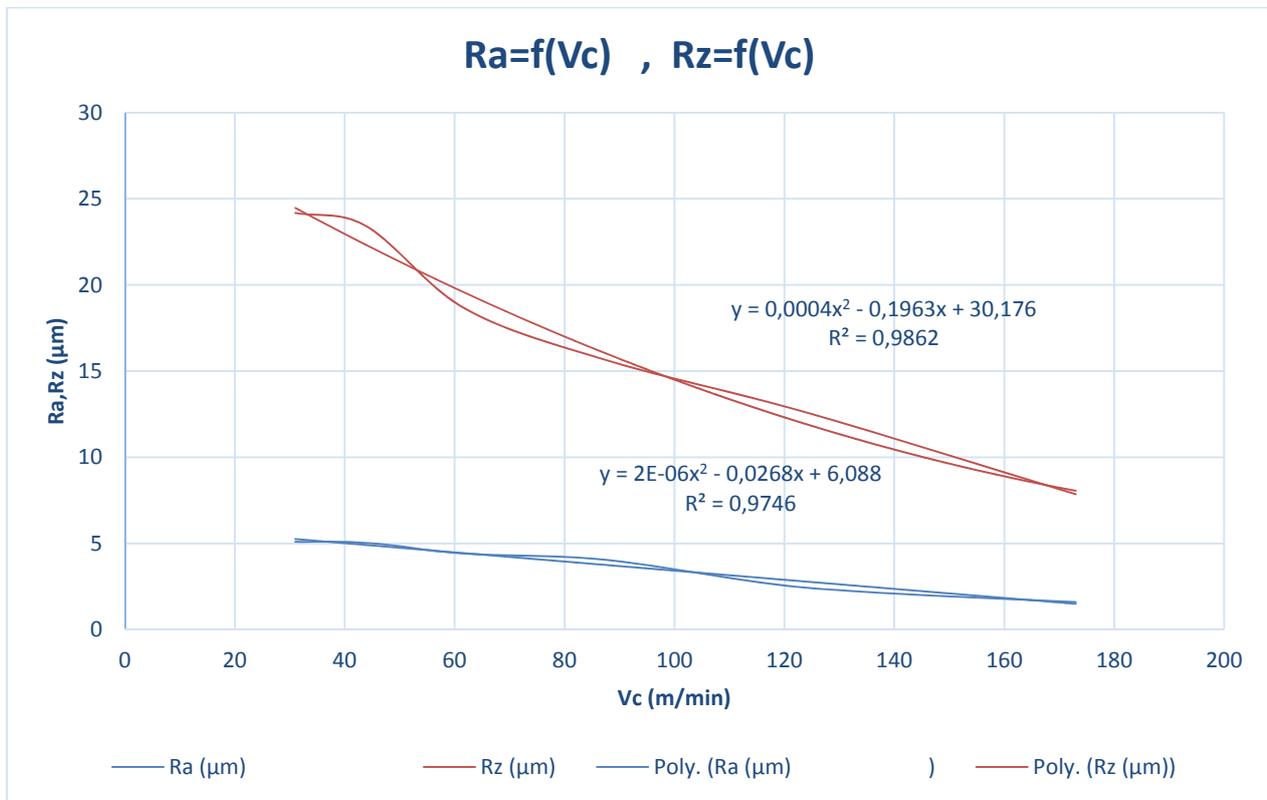


Figure V.15 : représentation graphique de $Rz=f(Vc)$ et $Ra=f(Vc)$ pour l'acier.

Les deux courbes représentent respectivement $Rz=f(Vc)$ et $Ra=f(Vc)$. On constate que pour les deux courbes Ra et Rz, plus la vitesse de coupe augmente, plus la rugosité diminue, donc la qualité de l'état de surface s'améliore. Cette amélioration de l'état de surface s'explique par le fait que la matière est ductile et les vitesses de coupe choisies sont élevées, ce qui ne favorise pas la formation de l'arête rapportée. Donc il n'y a pas de dégradation de l'état de surface.

e. Variation de f_c sur l'éprouvette d'acier XC45

Dans cette expérience, nous allons voir l'influence de l'avance de coupe sur la qualité de l'état de surface. Pour cela, nous usinerons en chariotage et à sec une barre en acier XC45 laminée qui comporte six (6) éprouvettes (figure V.16). Nous ferons varier pour chaque éprouvette l'avance de coupe f_c tout en fixant la profondeur et la vitesse de coupe.

Conditions de coupe

$p_c = 1 \text{ mm}$. (Constante)

$V_c = 89 \text{ m/min}$. (Constante)

$\phi.N^{\circ}1 = \phi.N^{\circ}2 = \phi.N^{\circ}3 = \phi.N^{\circ}4 = \phi.N^{\circ}5 = \phi.N^{\circ}6 = 40 \text{ mm}$.

$L1 = L2 = L3 = L4 = L5 = L6 = 30 \text{ mm}$.

Valeurs de l'avance de coupe

Fc1= 0.05 mm/tr. Appliquer sur le diamètre N°1.

Fc2= 0.071 mm/tr. Appliquer sur le diamètre N°2.

Fc3= 0.09 mm/tr. Appliquer sur le diamètre N°3.

Fc4= 0.125 mm/tr. Appliquer sur le diamètre N°4.

Fc5= 0.16 mm/tr. Appliquer sur le diamètre N°5.

Fc6= 0.18 mm/tr. Appliquer sur le diamètre N°6.

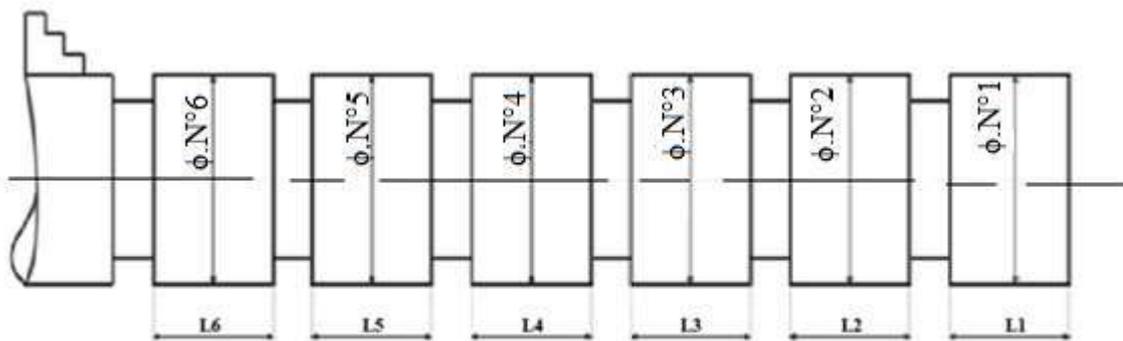


Figure V.16 : éprouvettes d'essais.

Pour faire l'usinage, on a utilisé le même montage mixte (mandrin + contre pointe tournante).

Après avoir fait l'usinage des six (6) éprouvettes avec de différentes avances de coupe, on a pris les mesures de l'état de surface de chaque éprouvette à l'aide du rugosimètre. Les valeurs obtenues pour chaque essai sont rapportées dans le tableau suivant :

N° diamètre	fc (mm/tr)	Ra (μm)	Rz (μm)
Ø.N°1	0,08	4,61	21,04
Ø.N°2	0,16	10,19	40,2
Ø.N°3	0,2	11,78	45,01
Ø.N°4	0.32	30	55
Ø.N°5	0.4	40	65
Ø.N°6	0.8	70	90

Tableau V.7 : résultats des mesures de la rugosité des éprouvettes d'acier pour la variation de fc
Les résultats obtenus dans le tableau présenté ci-dessus sont représentés sous forme de courbes dans le graphe suivant :

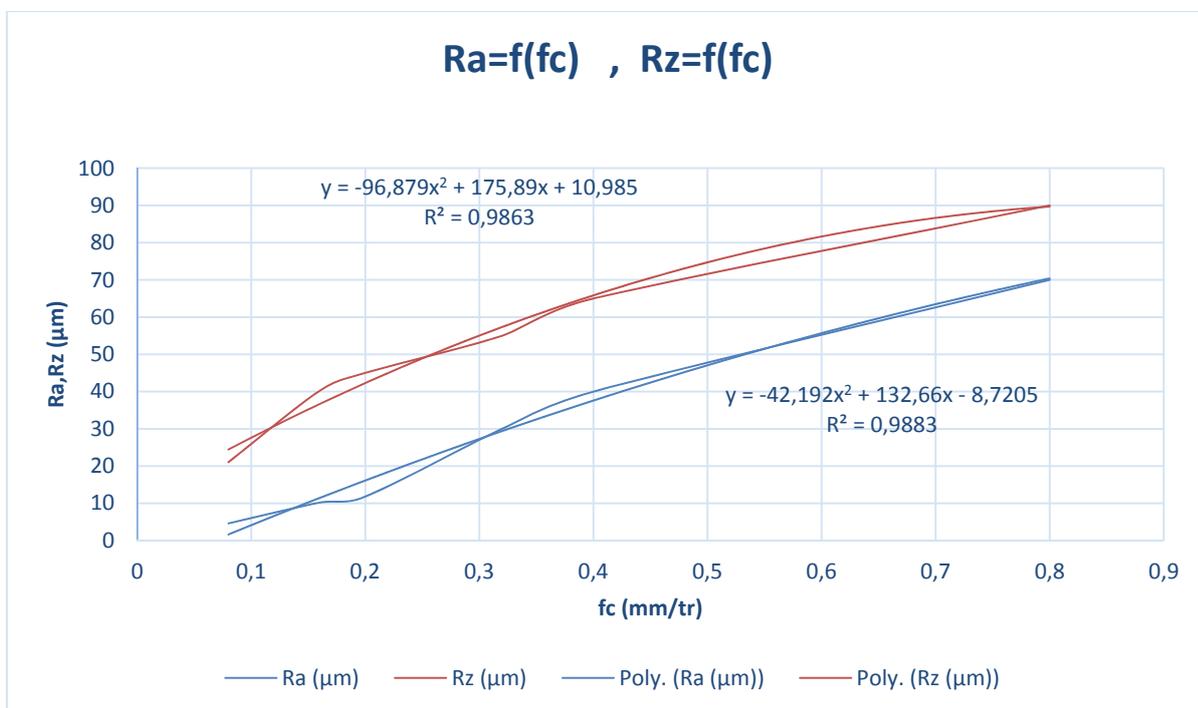


Figure V.17 : représentation graphique de $R_z=f(f_c)$ et $R_a=f(f_c)$ pour l'acier.

La figure (V.17) illustre les résultats de l'évolution de la rugosité en fonction de l'avance. L'analyse des courbes montre que ce paramètre a une influence très significative sur la rugosité. En effet, L'avance est le facteur déterminant de la qualité des surfaces usinées, en tournage par exemple, la surface engendrée comporte des sillons hélicoïdaux résultant de la forme de l'outil et du mouvement hélicoïdal outil-pièce. Ces sillons sont autant plus profonds et plus larges que l'avance est élevée, d'où la nécessité d'employer de faibles avances lors du tournage on finition.

f. Variation de P_c sur l'éprouvette d'acier XC45

Dans cette expérience, nous allons voir l'influence de la profondeur de coupe sur la qualité de l'état de surface. Pour cela, nous usinerons en chariotage et à sec une barre en acier XC45 moulée qui comporte six (6) éprouvettes (figure V.18). Nous ferons varier pour chaque éprouvette la profondeur de coupe P_c tout en fixant la vitesse et l'avance de coupe.

Conditions de coupe

$f_c = 0.09$ mm/tr.

$V_c = 89$ m/min.

$\phi.N^{\circ}1 = \phi.N^{\circ}2 = \phi.N^{\circ}3 = \phi.N^{\circ}4 = \phi.N^{\circ}5 = \phi.N^{\circ}6 = 40$ mm.

$L1 = L2 = L3 = L4 = L5 = L6 = 30$ mm.

Valeurs de la profondeur de coupe

$P_{c1} = 0.25$ mm. Appliquer sur le diamètre N°1.

$P_{c2} = 0.5$ mm. Appliquer sur le diamètre N°2.

$P_{c3} = 0.75$ mm. Appliquer sur le diamètre N°3.

$P_{c4} = 1$ mm. Appliquer sur le diamètre N°4.

$P_{c5} = 1.25$ mm. Appliquer sur le diamètre N°5.

$P_{c6} = 1.5$ mm. Appliquer sur le diamètre N°6.

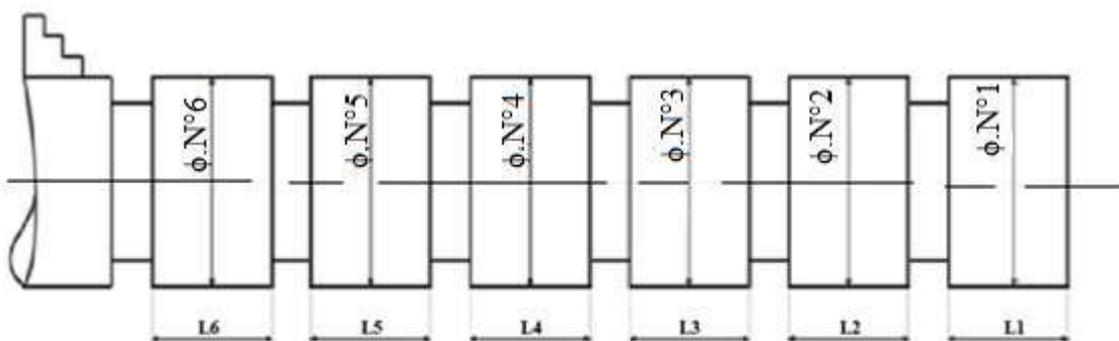


Figure V.18 : éprouvettes d'essai

Pour faire l'usinage, on a utilisé le même montage mixte (mandrin + contre pointe tournante).

Après avoir fait l'usinage des six (6) éprouvettes avec de différentes profondeurs de coupe, on a pris les mesures de l'état de surface de chaque éprouvette à l'aide du rugosimètre. Les valeurs obtenues pour chaque essai sont rapportées dans le tableau suivant :

N° diamètre	Pc (mm)	Ra (μm)	Rz (μm)
Ø.N°1	0,25	2,81	14,22
Ø.N°2	0,5	3,42	15,91
Ø.N°3	0,75	4,51	18,83
Ø.N°4	1	5,99	22,64
Ø.N°5	1,25	6,01	25,85
Ø.N°6	1,5	6,45	30,02

Tableau IV.8 : résultats des mesures de la rugosité des éprouvettes d'acier pour la variation de Pc

Les résultats obtenus dans le tableau présenté ci-dessus sont représentés sous forme de courbes dans le graphe suivant :

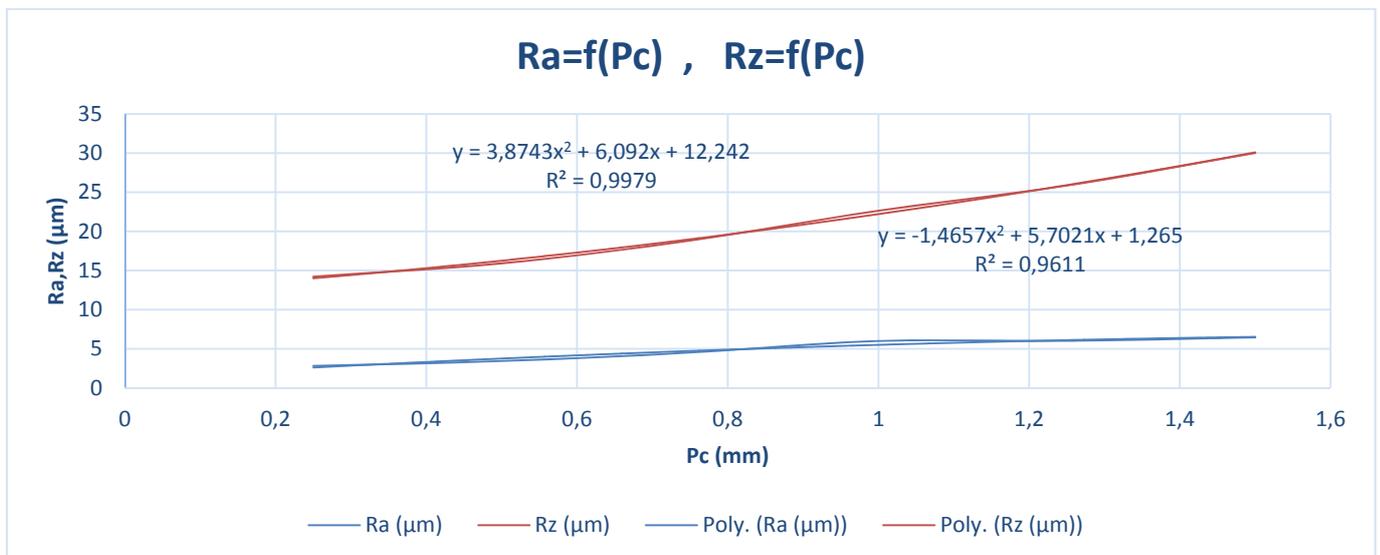


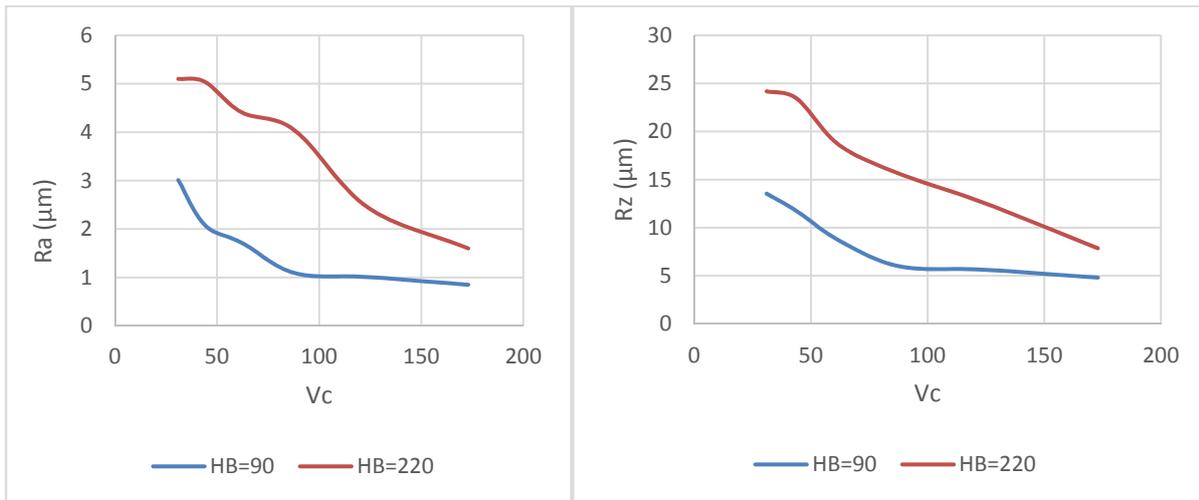
Figure IV.19 : Représentation graphique de $Rz=f(Pc)$ et $Ra=f(Pc)$ pour l'acier.

D'après cette figure, on constate que la courbe $Ra=f(Pc)$ reste plus ou moins constante (faible amélioration de la qualité). De même, la courbe $Rz=f(Pc)$ reste relativement constante (la différence est très faible), Cette augmentation de la rugosité s'explique par le travail avec les grandes profondeurs de passe qui génère des efforts de coupe important et influe sur la stabilité du système usinant, ce qui entraîne une élévation de larugosité.

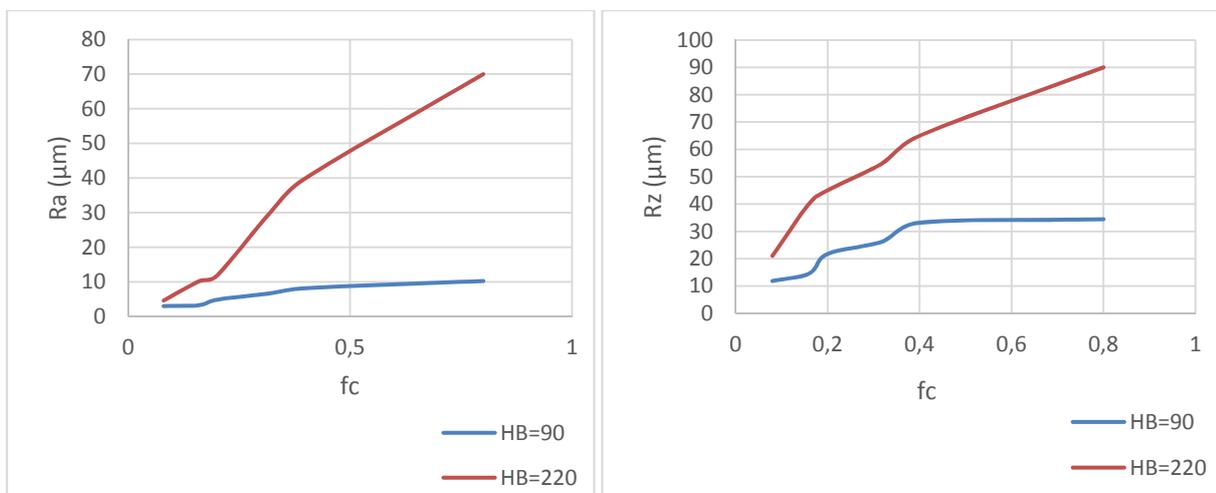
5. Influence de la dureté sur Ra et Rz :

Après avoir fait nos expériences sur deux matériaux de dureté différentes, l'aluminium ordinaire de **HB=90 Mpa** et acier XC45 de **HB= 220Mpa**. On a comparé les résultats obtenus pour chaque matériau pour mettre en évidence l'influence de la dureté des deux matériaux usinés sur la qualité de l'état de surface. Les figures qui vont suivre montrent cette différence.

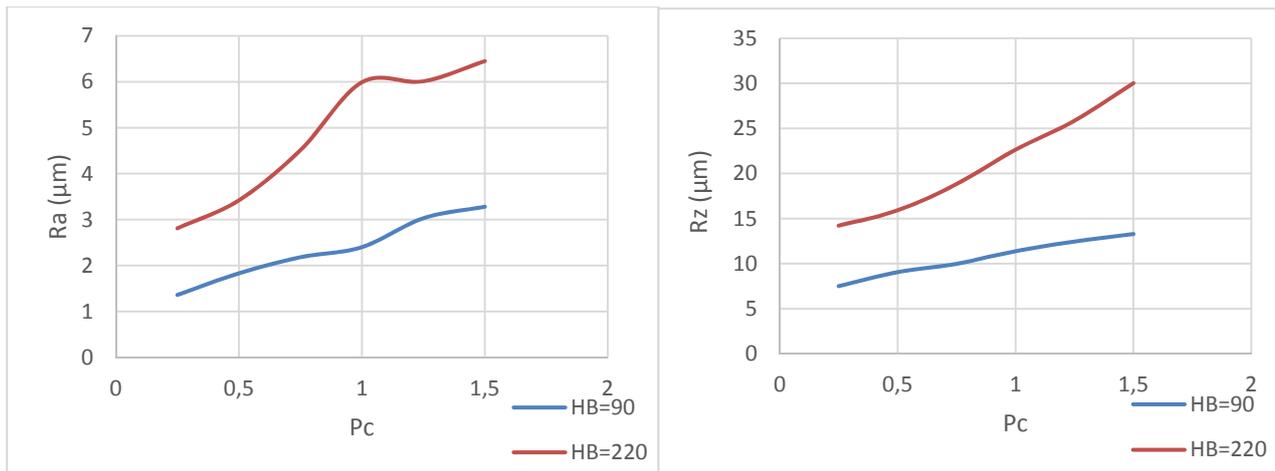
(Figure V.20 A, B et C).



A : variation de Vc avec $f_c = 0.09$ mm/tr et $P_c = 1$ mm



B : variation de f_c avec $V_c = 89$ m/min et $P_c = 1$ mm



C : variation de Pc avec $V_c = 89$ m/min et $f_c = 0.09$ mm/tr.

Figure V.20 : Influence de la dureté du matériau usiné sur la rugosité.

Pour chacune des figures, on constate que la qualité de l'état de surface de l'aluminium est meilleure que celle de l'acier pour le même régime de coupe ($V_c=89$ m/min , $a_p=1$ mm, $f_c=0.09$ mm/tr) et le même outil. Ce résultat peut être justifié par le fait que les efforts de coupe pendant l'usinage de l'aluminium sont faibles par rapport aux efforts de coupe pendant l'usinage de l'acier, ce qui aboutit à l'amélioration de l'état de surface de l'éprouvette d'aluminium à celle de l'acier.

6. Conclusion

Après avoir fait une présentation détaillée du matériel utilisé lors de nos travaux, une approche expérimentale a été décomposée en une phase d'usinage, une phase de mesure et une phase de représentations et discussions des résultats. Ces résultats viennent confirmer ce qu'a été dit dans le chapitre précédent par rapport à l'influence des différents paramètres de coupe à savoir : la vitesse, l'avance et la profondeur de coupe ainsi que la nature du matériau utilisé (la différence de dureté) sur la qualité de l'état de surface.

A partir des résultats du suivi de l'évolution de la rugosité en fonction des conditions de coupe, on peut tirer les conclusions suivantes :

Les conditions d'usinage (V_c , f , a_p) ont une influence considérable sur la qualité de la surface usinée. En effet, l'influence la plus pertinente sur la rugosité est attribuée à l'avance, suivie par la vitesse de coupe et enfin la profondeur de passe,.

La dureté à une influence considérable sur la qualité de la surface usinée.

Ce résultat a été déjà obtenu dans la littérature (**Jean-Pierre CORDEBOIS et COLL**, fabrication par usinage. Industrie et technologies.DUNOD, paris 2003).

A pair of traditional Chinese calligraphy brushes with black and white handles and gold ferrules, resting on a white inkstone. The brushes are positioned vertically on the right side of the page.

Conclusion générale



Conclusion générale

Pour assurer un bon fonctionnement d'un système mécanique, il faut que tous ces composants soient fabriqués suivant un cahier des charges qui donne toutes les caractéristiques que doivent avoir ces pièces (mécaniques et dimensionnelles). Une de ces principales caractéristiques est la qualité de l'état de surface (rugosité), qui est primordiale pour un bon fonctionnement de certains systèmes mécaniques. On prend l'exemple le plus explicite pour démontrer l'importance de cette caractéristique qui est le piston, en effet la surface intérieure du cylindre doit être de très bonne qualité (rugosité faible) pour que le joint torique monté sur le piston ne se détériore pas rapidement à fin d'assurer sa fonction d'étanchéité. La réalisation de cette surface dépend de plusieurs conditions de coupe.

Le travail présenté ici visait à comprendre l'influence des conditions de coupes sur la qualité de l'état de surface, dans l'opération de chariotage d'une ébauche en tournage et à mesurer sa rugosité. Notre travail est fondé sur l'application d'un plan d'expérience. Au début nous avons préparé les bruts (barres d'aluminium et acier XC45) qui viennent du commerce, puis on a usiné chaque une des barres de sorte à créer six (6) éprouvettes d'essai. Chaque barre est destinée à la variation d'un des paramètres de coupe (vitesse, avance et profondeur de coupe).

Une fois l'usinage terminé nous avons mesuré la rugosité de chaque éprouvette de chaque barre à l'aide d'un rugosimètre. Pour finir on a représenté les résultats obtenus dans des graphes puis on a discuté les résultats tout en montrant l'influence de chaque paramètre sur la qualité de l'état de surface. Il faut noter que pour voir l'influence de la nature du matériau (dureté), on a comparé les résultats obtenus pour l'aluminium et l'acier XC45.

Ce travail, nous a permis de nous familiariser avec le domaine de la recherche bibliographique et au travail dans l'atelier, ainsi que l'utilisation du matériel de mesure de l'état de surface.

Comme perspective nous recommanderons l'étude et l'application de l'optimisation, pour avoir des combinaisons adéquates des paramètres de coupe qui influent sur la qualité de l'état de surface, pour avoir les exigences du cahier des charges d'une pièce mécanique avec le plus bas prix d'usinage possible.

Enfin, nous souhaitons aussi de donner des significations physique des différents paramètres de modélisations des valeurs $Ra(f(pc))$, $Ra(f(fc))$, $Ra(f(vc))$.

Two calligraphy brushes with black and gold handles and white bristles are positioned vertically on the right side of the page. A scroll of paper is partially visible behind them.

Annexes



Références bibliographiques

[1] : **L.RIMBAUD**, **guide pratique de l'usinage 1 .fraisage**, édition hachette technique : 978_2_01_180298_9, année2010.

[2] : **J.JAKUB**, **guide pratique de l'usinage 2.tournage**, édition hachette technique : 978_2_01_180299_6, année2010.

[3] : **Alain passeron, François Bagur.**, Techniques de l'ingénieur: tournage, matériaux pour outil de coupe, (BM7086-1), (BM7081-1).

[4] : **s.bensaada**, « coupe des métaux », thèse de doctorat. , Université Bordeaux 1, 2003.

[5] : **D.Gelin. M.Vincent**, « élément de fabrication », rapport d'activité, 1995.

[6] : **R. Laheurte**, Application de la théorie du second gradient à la coupe de matériaux. Thèse, Université Bordeaux 1, 2004.

[7]: «Géométrie de l'outil», cours de terminales, S.I.T génie mécanique par **M. Richard**, octobre 2007.

[8]: **Rabah GHOUINI** **memoire fin d'etude**, « amelioration des parametres technologique de coupe en tournage », juin2011.

[9] : «Les paramètre de coupes –prof .PDF», sciences et techniques industrielles.

[10] **André CHEVALIER**, guide du dessinateur industriel, HACHETTE TECHNIQUE. 2004.

[11] **Bernard RAPHET** technique de l'ingénieur : état de surface (caractérisation). Éditions Techniques de l'Ingénieur • 249, rue de Crimée 75019 Paris – France. 2008

[12] **Luck TROTTIER**, éléments de fabrication mécanique, note de cours, Eté 2009.

[13] **Jean-Pierre CORDEBOIS et COLL**, fabrication par usinage. Industrie et technologies. DUNOD, paris 2003.

Lexique des principales notations utilisées

af : Angle d'engagement de l'arête [$^{\circ}$]

ap: Profondeur de passe [mm].

D : Le diamètre de l'éprouvette [mm].

f : avance [mm/tr]

fbat: Avance par battement [mm/bat].

Fc: L'effort de coupe [N].

ft: Avance par tour [mm/tr].

Fn: L'effort normal [N].

Fns: L'effort normal au plan de cisaillement [N].

FS: L'effort de cisaillement [N].

Ft : L'effort tangentiel [N].

fz: Avance par dent [mm/dent].

Kre: L'angle de direction d'arête en travail [$^{\circ}$].

K'r: L'angle de direction de l'arête secondaire de l'outil [$^{\circ}$].

L : longueur de passe [mm].

Ma : Le mouvement d'avance.

Mc : Le mouvement de coupe.

Mp : Le mouvement de pénétration.

N : la vitesse de rotation [tr/min].

Pb: Le plan orthogonal à la face de dépouille.

Pf : Le plan de travail conventionnel.

Pfe: Le plan de travail.

Pg : Le plan orthogonal à la face de coupe.

Pp: Le plan vers l'arrière de l'outil.

Ppe : Le plan vers l'arrière en travail.

Pre: Le plan de référence en travail.

Ps : Le plan d'arête de l'outil. *P*

se : Le plan d'arête en travail. *R* : Le rayon d'acuité [mm].

Ra: La rugosité arithmétique moyenne [μm].

Rz : La rugosité maximale de profil [μm].

Rt: La rugosité théorique totale [μm].

re : Le rayon de bec [mm].

