

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : GENIE MECANIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : GENIE MECANIQUE

Spécialité : FABRICATION MECANIQUE ET
PRODUCTIQUE

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

**Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface
lors de l'usinage avec lubrification et à sec de l'acier XC38**

Présenté par : *Bougherara Abdelbaki*

Encadrant : *Dr. Nehal Abdelaziz* MCA Université Badji mokhtar - annaba-

Jury de Soutenance :

Dr. MOKAS NACER	MCA	Université Badji mokhtar - annaba	Président
Dr. NEHAL ABDELAZIZ	MCA	Université Badji mokhtar - annaba	Encadrant
Dr. DIB AMAR	MCA	Université Badji mokhtar - annaba	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu qui nous a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail.

Nos vifs remerciements sont destinés à Mr Nehal Abdelaziz notre promoteur, pour son aide, ces critiques constructives, ses explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de ses orientations tout au long de ce travail et pour avoir apporté tant de soins à la réalisation de ce mémoire.

Nous ne pouvons pas oublier de présenter notre gratitude à nos parents pour les efforts inlassables qu'ils ne cessent de déployer pour nous.

Nous remercions également les membres de jury qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail. Mr. Mokas Nacer en tant que Président de jury, et Mr. Dib Amar en tant que examinateurs.

Sans oublier l'équipe du stage en l'entreprise de Ferroviair Mr. Brahimi Reda et Mr. Ferhat,

Que tous ceux qui ont contribué à notre formation trouvent ici l'expression de nos sincères gratitude.

Enfin, un merci particulier à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien.

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui je dois tout ce travail est
le fruit de leur amour, leurs encouragements.

A ma chère mère, à mon cher père, à mon cher frère à ma chère sœur,

A mes amis, à toutes mes amies à mes camarades,

Et à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce
travail.

Résumé

L'usinage tient une place considérable dans l'industrie, c'est un des phases les plus répandu en mécanique. A ce titre, la maîtrise du procédé de tournage, notamment lors d'une opération de finition, est devenu un enjeu majeur dans le secteur industriel. La compréhension des phénomènes physiques présents lors d'un usinage de finition est un facteur important pour l'optimisation d'un procédé de fabrication par enlèvement de matière. L'objectif de cette étude c'est l'effet de la vitesse de coupe sur l'état de la surface (rugosité)

Pour la manipulation en tournage, on a utilisé une pièce cylindrique de diamètre 40mm et de longueur 140 mm, on a fait l'usinage en deux fois et à chaque fois on change les valeurs de la vitesse de coupe.

Le matériau usiné est du XC38, matière doux dans une opération de chariotage en tournage.

Mots clés : Rugosité, Tournage, vitesse de coupe.

المخلص

تحتل الآلات مكانة كبيرة في الصناعة، فهي واحدة من أكثر المراحل انتشارًا في الميكانيكا. على هذا النحو، فإن إتقان عملية التحول، خاصة أثناء عملية التشطيب، أصبح تحديًا كبيرًا في القطاع الصناعي. يعد فهم الظواهر الفيزيائية الموجودة أثناء المعالجة النهائية عاملاً مهمًا لتحسين عملية التصنيع عن طريق إزالة المواد. الهدف من هذه الدراسة هو تأثير سرعة القطع على حالة السطح (الخشونة) للتلاعب في الدوران، استخدمنا جزءًا أسطوانيًا بقطر 40 مم و بطول 140 مم، قمنا بالقطع مرتين وفي كل مرة قمنا بتغيير قيمة سرعة القطع.

المواد المصنعة هي XC38 ، وهي مادة ناعمة في عملية الدوران.

الكلمات المفتاحية: الخشونة، الدوران، سرعة القطع.

Abstract

Machining holds a considerable place in industry; it is one of the most widespread phases in mechanics. As such, mastering the turning process, especially during a finishing operation, has become a major challenge in the industrial sector. Understanding the physical phenomena present during finish machining is an important factor for optimizing a manufacturing process by material removal. The objective of this study is the effect of the cutting speed on the state of the surface (roughness) for manipulation in turning, we used a cylindrical part with a diameter of 40mm and 140 mm long, we did the machining twice and each time we changed the value of the cutting speed.

The machined material is XC38, a soft material in a turning operation.

Keywords: roughness, turning, cutting speed.

Liste des figures

CHAPITRE 1

Figure I.1 : Procédé de tournage.....	7
Figure I.2 : Constitution d'un tour parallèle.....	8
Figure I.3 : Opérations de base en tournage.....	9
Figure I.4 : Opération de dressage d'un tube.....	9
Figure I.5 : Montage en lunette.....	10
Figure I.6 : Angles de coupe.....	10
Figure I.7 : Influence du rayon du bec de l'outil sur la surface à usinée.....	11
Figure I.8 : Copeau continu.....	12
Figure I.9 : Copeau cisailé.....	12
Figure I.10 : Copeau discontinu.....	12
Figure I.11 : Usinage par enlèvement de matière. [2].....	13
Figure I.12 : Usinage par enlèvement de matières.....	13
Figure I.13 : Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage.....	14
Figure I.14 : Critères permettant de définir les paramètres de coupe.....	15
Figure I.15 : Surfaces de la pièce.....	16
Figure I.16 : Eléments de l'outil.....	17
Figure I.17 : Angles du taillant (outil en travail).....	18
Figure I.18 : Plans et angles en main sur les outils courants : outil à chariotier droit (NF E 66-502).....	19
Figure I.19 : Définition de base d'un outil en tournage [12].....	21
Figure I.20 : Géométrie de l'arête de coupe.....	22
Figure I.21 : Gamme des angles d'orientation d'arête.....	22
Figure I.22 : Dimensions des angles de coupe dans le de tournage.....	24
Figure I.23 : Vitesse de coupe.....	24
Figure I.24 : Vitesse de coupe, diamètre et vitesse de rotation.....	25
Figure I.25 : Vitesse d'avance.....	26
Figure I.26 : Avance f dans le cas de tournage.....	26

CHAPITRE 2

Figure II.1 : Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface [17].....	30
Figure II.2 : Principaux défauts de surface [18].....	31
Figure II.3 : Rt Hauteur de profil totale [21].....	32
Figure II.4 : Rz Hauteur de profil maximum (moyenne) [21].....	32
Figure II.5 : L'écart moyen arithmétique du profil (Ra) [21].....	32
Figure II.6 : Principaux critères de rugosité [21].....	33
Figure II.7 : Sillons théoriques [18].....	33
Figure II.8 : symbole graphique de l'état de surface.....	35
Figure II.9 : Exemple de symbolisation.....	35
Figure II.10 : Formes d'usure sur les outils de coupe.....	37
Figure II.11 : Tableau des rugosités [26].....	37
Figure II.12 : Représentation schématique d'un appareil à palpeur.....	40
Figure II.13 : Rugosimètre avec patin.....	41
Figure II.14 : Rugosimètre avec patin.....	41
Figure II.15 : Appareille de mesure tridimensionnelle.....	42
Figure II.16 : Profilomètre laser.....	43
Figure II.17 : Principe de mesure interférométrique.....	44

Figure II.18 : Méthodes de Tolansky	45
---	----

CHAPITRE 3

Figure III.1 : Vue générale	52
Figure III.2 : Commande numérique	52
Figure III.3 : Outil de chariotage finition	53
Figure III.4 : Outil de chariotage d'ébauche	53
Figure III.5 : Pastille d'outil en carbure « SECO »	53
Figure III.6 : L'éprouvette	56
Figure III.7 : dessin de montage de l'arbre	56
Figure III.8 : montage de la pièce	57
Figure III.9 : Rugosimètre TR220	58
Figure III.10 : Appareille de mesure tridimensionnelle	59
Figure III.11 : Profilographe 3D de l'usinage du palier 1 avec lubrification	59
Figure III.12 : Profilographe 3D de l'usinage du palier 1 à sec	60
Figure III.13 : Profilographe 3D de l'usinage du palier 3 avec lubrification	60
Figure III.14 : Profilographe 3D de l'usinage du palier 3 à sec	61
Figure III.15 : Evolution de la rugosité(Ra) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l'usinage avec lubrification, a et f constants	64
Figure III.16 : Evolution de la rugosité(Rq) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l'usinage avec lubrification, a et f constants	64
Figure III.17 : Comparaison entre l'évolution de la rugosité(Ra) et (Rq) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l'usinage avec lubrification, a et f constants	65
Figure III.18 : Evolution de la rugosité(Ra) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l'usinage à sec, a et f constants à sec	66
Figure III.19 : Evolution de la rugosité(Rq) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l'usinage à sec, a et f constants à sec	66
Figure III.20 : Comparaison entre l'évolution de la rugosité(Ra) et (Rq) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l'usinage à sec	67
Figure III.21 : Evolution de la rugosité(Ra) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l'usinage avec lubrification, a et f constants	68
Figure III.22 : Evolution de la rugosité(Rq) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l'usinage avec lubrification, a et f constants	68
Figure III.23 : Comparaison entre l'évolution de la rugosité(Ra) et (Rq) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l'usinage avec lubrification, a et f constants	69
Figure III.24 : Evolution de la rugosité(Ra) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l'usinage à sec, a et f constants à sec	70
Figure III.25 : Evolution de la rugosité(Rq) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l'usinage à sec, a et f constants à sec	70
Figure III.26 : Comparaison entre l'évolution de la rugosité(Ra) et (Rq) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l'usinage à sec	71
Figure III.27 : Comparaison entre les résultats obtenues de Ra avec et sans lubrification pour l'essai 1 et 2	71
Figure III.28 : Comparaison entre les résultats obtenues de Rq avec et sans lubrification pour l'essai 1 et 2	72
Figure III.29 : Comparaison entre les résultats obtenues de Ra avec et sans lubrification pour l'essai 3 et 4	72
Figure III.30 : Comparaison entre les résultats obtenues de Rq avec et sans lubrification pour l'essai 3 et 4	73
Figure III.31 : Exemple de surface fini avec un profil de l'outil.	73

Liste des tableaux

Chapitre 2

Table II.1 : Comparaison entre la méthode mécanique et la méthode optique.....	45
--	----

Chapitre 3

Table III.1 : Condition d'essai 1	49
Table III.2 : Condition d'essai 2.....	49
Table III.3 : Condition d'essai 3	50
Table III.4 : Condition d'essai 4.....	51
Table III.5 : Composition chimique de l'acier XC38	54
Table III.6 : Caractéristiques mécanique de la XC38.....	54
Table III.7 : Tableau des valeurs de la rugosité (Ra) lors de l'usinage 1 avec lubrification	63
Table III.8 : Tableau des valeurs de la rugosité (Ra) lors de l'usinage 1 à sec	65
Table III.9 : Tableau des valeurs de la rugosité (Ra) lors de l'usinage 2 avec lubrification	67
Table III.10 : Tableau des valeurs de la rugosité (Ra) lors de l'usinage 2 a sec	69

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE :	1
I. CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	2
I.1 Introduction :	3
I.2 GENERALITE SUR L'USINAGE :	4
I.2.1 Introduction :	4
I.2.2 Les procédés d'usinage :	4
I.2.3 But de l'usinage :	4
I.3 PROCEDE DE TOURNAGE :	6
I.3.1 PRINCIPE DU TOURNAGE :	6
I.3.2 LE TOUR :	7
I.3.3 LES DIFFERENTES OPERATIONS D'USINAGE :	8
I.3.4 LES DIFFERENTS MONTAGES :	9
I.3.5 L'OUTIL :	10
I.3.6 FORMATION DU COPEAU :	11
I.4 COUPE DES METAUX :	12
I.4.1 Définition de la coupe des métaux :	12
I.4.2 PRINCIPE DE LA COUPE DES METAUX :	13
I.4.3 OUTIL DE COUPE :	16
I.4.3.1 Plan de l'outil en travail :	20
I.4.3.2 Angles de l'outil :	20
I.4.3.3 La géométrie de l'arête :	22
I.4.3.4 MATERIAUX DES OUTILS DE COUPE :	23
I.4.4 LES PARAMETRES DE COUPE :	23
I.4.4.1 VITESSE DE COUPE (VC) :	24
I.4.4.2 VITESSE D'AVANCE (V_f) ET AVANCE/TOUR (F) :	26
I.4.4.3 PROFONDEUR DE PASSE :	27
I.5 CONCLUSION :	27
II. CHAPITRE 2 : LA RUGOSITE	28
II.1 Introduction :	29
II.2 Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface :	29
II.3 Principaux défauts de surface :	30
II.4 Rugosité :	31

II.5	Principaux critères de rugosité :.....	31
II.5.1	Rugosité totale R_t :	32
II.5.2	Rugosité R_z :	32
II.5.3	Rugosité moyenne arithmétique R_a :.....	32
II.6	Evaluation de la rugosité :	33
II.7	Les spécifications normalisées :.....	34
II.8	Usure des outils de coupe :	35
II.8.1	Usure en dépouille :.....	36
II.8.2	Usure suivant la surface d'attaque :.....	36
II.8.3	Fissuration de l'arête :.....	36
II.8.4	Rupture (cassure) de la pointe :	36
II.8.5	Déformation plastique :.....	36
II.8.6	Entaille :.....	36
II.9	Mesure de la rugosité :.....	38
II.9.1	Appareils à palpeur :.....	39
II.9.2	Principe de mesure :.....	40
II.9.3	Le rugosimètre :.....	40
II.9.3.1	Le rugosimètre avec patin :.....	41
II.9.3.2	Le rugosimètre sans patin:	41
II.9.4	Mesure tridimensionnelle :	42
II.9.5	Profilomètre laser :.....	43
II.9.6	Méthodes de mesure interférométrique :	43
II.9.7	Méthode de tolansky :.....	44
II.10	Comparaison entre la méthode optique et la méthode mécanique (palpage) :.....	45
II.11	Conclusion :	46
III.	Chapitre III : Partie Expérimentale.....	47
III.1	Expérience et équipement utilisés	48
III.1.1	Routage d'usinage	48
	Le premier usinage :	48
III.1.2	Equipements utilisés :.....	51
III.1.2.1	Machine-outil utilisée :.....	51
III.1.2.2	Géométrie de l'outil :	53
III.2	Matériaux utilisé :.....	54
III.2.1	Analyse technique de la matière de l'arbre :	54
III.2.2	Les désignations de la matière :	54

III.2.3	Composition chimique :.....	54
III.2.4	Caractéristiques mécanique (moyennes état normalisé) :	54
III.2.5	Propriétés :	55
III.2.6	Domaine d'application :	55
III.3	Régime de coupe :.....	55
III.4	Présentation de l'éprouvette :	55
III.5	Contrôle de l'état de surface :.....	57
III.5.1	Rugosimètre :	57
III.5.2	Mesure tridimensionnelle :	58
III.5.2.1	Exemple de quelques paliers qui nous avons mesurées avec cette apparence :...	59
III.6	La vitesse de coupe V_c :.....	61
III.7	Résultat obtenues :.....	63
III.7.1	L'influence des paramètres de coupe en particulier la vitesse de coupe en usinage et son impact sur l'état de surface :.....	63
III.8	Discussion :.....	74
III.9	Conclusion et perspectives.....	75
CONCLUSION GENERALE :		76

INTRODUCTION GENERALE :

Le tournage est l'un des procédés d'usinage les plus utilisés dans l'industrie mécanique. Ainsi, le choix des paramètres de coupe optimaux (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) est très important afin d'assurer un meilleur état de surface des pièces usinées et la durée de vie des outils de coupe.

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

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 le plus rapidement possible, en réduisant au mieux les coûts et les défauts de production, l'interface outil-copeau est un lieu d'interactions complexes entre phénomènes mécaniques, thermique 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 plan de ce mémoire est le suivant

Dans le premier chapitre, une recherche bibliographique portant sur les procédés de tournage dans un premier temps, en suite on parle des paramètres de coupes

Dans le deuxième chapitre, on a défini la rugosité puis une liste exhaustive principaux critères de rugosité et les des différents instruments de mesure de rugosité.

Le dernier chapitre est la partie expérimentale de l'étude de l'influence de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface.

En fin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

I. CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction :

La **coupe des métaux** et ses **théories** sont à la base des connaissances de l'usinage par enlèvement de la matière, une des techniques de fabrication mécanique, très complexe, lui valant souvent les termes « **process de coupe** », « **procédé de coupe** », « **procédé d'usinage** » ou « **process d'usinage** ».

Le procédé d'usinage, dont l'origine est très ancienne, a connu une grande expansion avec de nouvelles Machines-Outils et aussi avec la mécanisation de plus en plus poussée des ateliers de fabrication. Malgré l'apparition de nouvelles techniques au cours des dernières années, elle reste à l'heure actuelle l'un des procédés les plus largement utilisés. Pour se convaincre de son importance économique, il suffit de considérer le volume des dépenses faites aux U.S.A pour l'usinage des métaux. Il représente 5 % du produit national brut, ce qui est énorme pour une seule technique.

La recherche d'une **productivité** toujours **meilleure**, de la coupe des métaux est donc une préoccupation majeure. Cette amélioration permanente repose plus ou moins directement sur **l'étude approfondie des mécanismes physiques et des lois régissant ce procédé**. Celle-ci reste donc un objectif essentiel. Son intérêt ne peut être éclipsé par le développement de nouveaux moyens d'usinage ou de nouvelles techniques de commande et de programmation, même si ces derniers points participent aussi au développement de la **fabrication à grande vitesse**.

La mise en œuvre rationnelle de ces techniques passe en effet par une connaissance approfondie du processus de coupe et une maîtrise des paramètres qui le contrôlent.

I.2 GENERALITE SUR L'USINAGE :

I.2.1 Introduction :

L'usinage par enlèvement de matière consiste à réduire progressivement les dimensions d'une pièce en utilisant un outil à froid et sans déformation du métal. La quantité de matière enlevée est appelée copeaux et l'outil utilisé pour enlever la matière est appelé outil de coupe. Pour effectuer l'usinage d'une pièce, l'opérateur utilise des machines appelées machines-outils. [1]

I.2.2 Les procédés d'usinage :

Les procédés d'usinage sont extrêmement variés et leur distinction se fait suivant trois critères essentiels :

- La date de leurs apparitions ; les procédés traditionnels et les non traditionnels.
- Les phénomènes physiques correspondant ; procédés de coupe, par abrasion, et procédés physico.
- Le type des machines et des outils utilisé ; en fonction des outils et des machines utilisées, on distingue différents procédés d'usinage. Les procédés les plus répandus sont le tournage, fraisage, perçage, rectification, rabotage, ...etc. La fabrication débute avec ce que l'on appelle un matériau brut, elle le modifie jusqu'à ce qu'il soit conforme au dessin de détail, donc aux exigences technique du bureau d'études. [2]

I.2.3 But de l'usinage :

L'usinage fait partie du cycle de fabrication d'une pièce mécanique. Une cotation exhaustive est utilisée pour la définir. Il vise à définir les dimensions, la précision, la géométrie et l'état de surface de toutes les surfaces qui composent la pièce usinée. Le concepteur et/ou l'usineur choisissent le type d'usinage à réaliser, la machine, l'outil et le support de pièce pour obtenir tous les éléments de cotation de la surface considérée à chaque phase de la gamme de fabrication.

Les surfaces usinées peuvent généralement être planes ou révolutionnaires. Le fraisage (surface plane) et le tournage (surface de révolution) sont les principaux usinages.

Avec l'introduction de la commande numérique, il est désormais possible de fabriquer une variété de surfaces courbes. Il convient de noter que les outils utilisés sont presque identiques

à ceux utilisés pour les machines conventionnelles et que leurs trajectoires sont constituées de segments de droites et d'arcs de cercles. Les coûts associés à l'usinage comprennent le temps de travail, l'épaisseur de la matière à extraire, l'usure de la machine-outil, les consommables (outil, lubrifiant, courant électrique) et le stockage. Ainsi, seuls les usinages indispensables sont effectués.

On distingue seize fonctions principales que peut remplir la surface d'une pièce. Elles font partie de la cotation d'état de surface :

- Surface de contact avec une autre pièce ;
- Frottement de glissement lubrifié (FG) ;
- Frottement à sec (FS) ;
- Frottement de roulement (FR) ;
- Frottement fluide (FF) ;
- Résistance au matage (RM) ;
- Etanchéité dynamique avec et sans joint (ED) ;
- Etanchéité statique avec et sans joint (ES) ;
- Ajustement fixe avec contrainte (AC) ;
- Adhérence, collage (AD) ;
- Surface libre, indépendante :
- Face de coupe d'un outil (OC) ;
- Résistance aux efforts alternes ;
- Résistance à la corrosion (RC) ;
- Destinée à recevoir un revêtement, peinture (RE) ;
- Destinée à recevoir un dépôt électrolytique (DE) ;
- Mesure (ME) ;
- Aspect (AS) ;

Ces fonctions vont définir :

- Les dimensions finales de la pièce avec les tolérances ;
- La cotation de forme et de géométrie des surfaces usinées ;
- L'état de surface requis (rugosité).

C'est l'ensemble de ces éléments de cotation qui va déterminer le type d'usinage à effectuer, ses paramètres, la finition nécessaire, le contrôle à effectuer. [3]

I.3 PROCÉDE DE TOURNAGE :

Le tournage est un processus de fabrication mécanique impliquant l'enlèvement de matière et l'utilisation d'outils à arête unique. Le mouvement principal du procédé est le mouvement de rotation (mouvement de coupe).

Le mouvement d'avance, un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non), est animé par l'outil pour définir le profil de la pièce. Des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes) peuvent être obtenus en combinant ces deux mouvements et la forme de la partie active de l'outil.

I.3.1 PRINCIPE DU TOURNAGE :

La pièce est animée d'un mouvement circulaire uniforme (M_c) et est généralement tenue par le mandrin. [4]

L'outil peut se déplacer en translation suivant deux directions qui sont perpendiculaires entre elles et appartiennent à un plan auquel l'axe de la broche est parallèle.

Le premier mouvement de translation est parallèle à l'axe de la broche.

Le deuxième mouvement de translation est perpendiculaire à l'axe de la broche.

La figure I.1 représente le procédé de tournage.

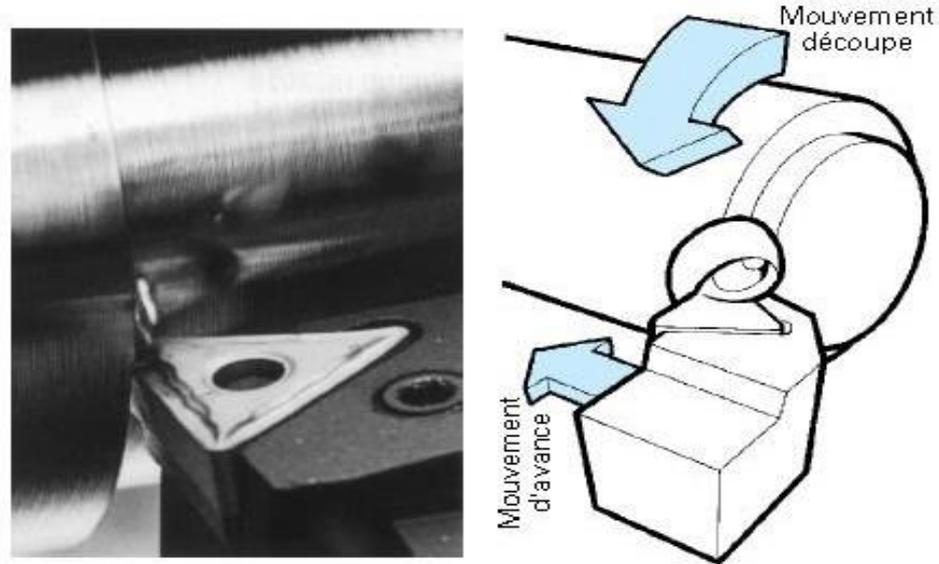


Figure I.1 : Procédé de tournage

I.3.2 LE TOUR :

Le type de machine utilisé en tournage est le tour. [5]

Les tours permettent de réaliser des surfaces hélicoïdales (filetage) et des surfaces de révolution : cylindres, cônes et plans (génératrice perpendiculaire à l'axe de révolution). L'utilisation principale de ces machines est l'usinage des arbres.

On peut classer les tours en deux catégories : Les tours parallèles qui sont réservés aux travaux unitaires et en petite série et les tours spéciaux automatiques et semi-automatiques qui sont destinés au travail en série.

On distingue deux classes : tours mono-broches et tours multibroches (le nombre de broches porte-pièces est : 4, 6 ou 8 broches). Chaque broche comporte généralement deux chariots porte-outils radiaux et un porte-outil axial. Les outils travaillent simultanément.

On trouve :

- Tour Semi-Automatique A Décolleter,
- Tour Revolver, Tour A Copier,
- Tour A Commande Numérique,
- Etc,...

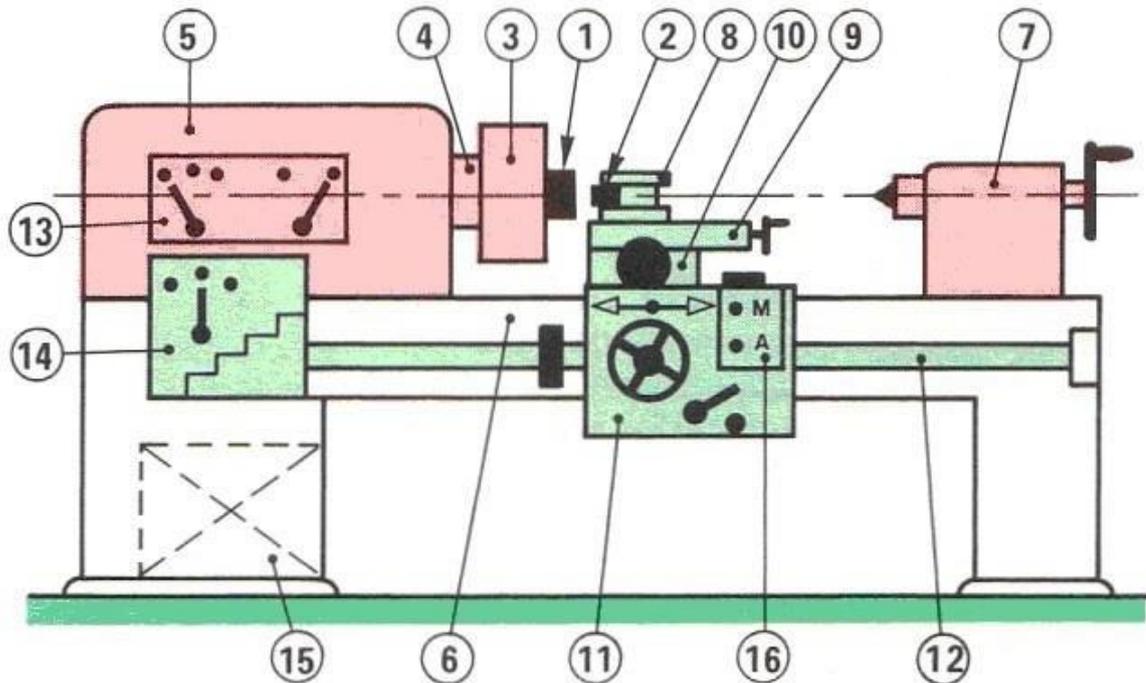


Figure I.2 : Constitution d'un tour parallèle

Avec :

1 = Pièce ; 2 = Outil ; 3 = Mandrin ; 4 = Broche ; 5 = Poupée fixe ; 6= Banc ;
 7 = Poupée mobile ; 8 = Tourelle porte-outils ; 9 = Chariot supérieur ; 10 = Chariot transversal ; 11= Trainard ; 12 = Barre de chariotage ; 13 = Boite des vitesses ; 14 = Boite des avances ; 15 = Moteur ; 16 = Contacteur.

I.3.3 LES DIFFERENTES OPERATIONS D'USINAGE :

En tournage extérieur, on peut souvent dissocier les pièces complexes en profils découpe 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 :

1. tournage longitudinal, ou chariotage,
2. dressage,
3. tournage de cônes,
4. contournage.

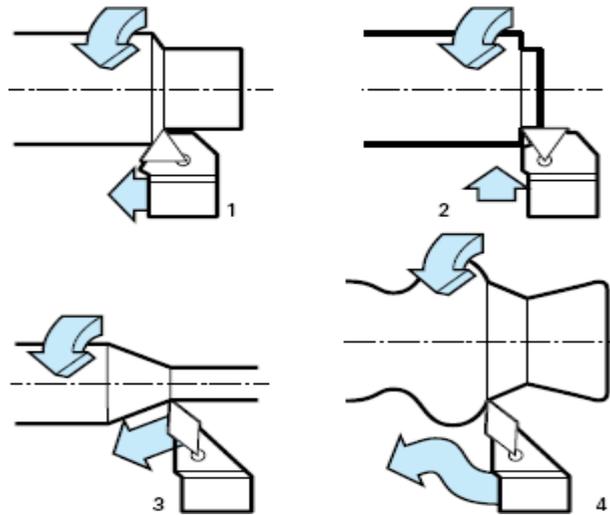


Figure I.3 : Opérations de base en tournage

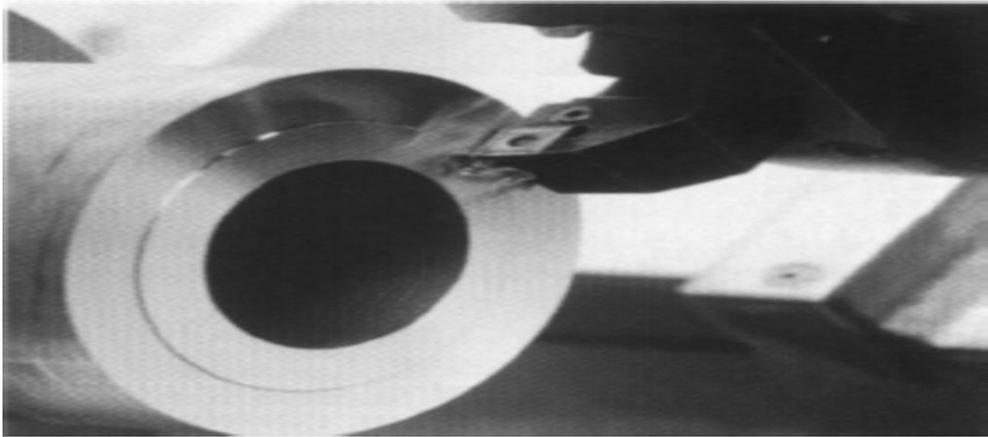


Figure I.4 : Opération de dressage d'un tube

I.3.4 LES DIFFERENTS MONTAGES :

En tournage, les différents montages sont :

- Montage en l'air sur mandrin à trois mors qui convient pour le tournage extérieur ou intérieur des pièces courtes,
- Montage entre pointes ou tournage en lunettes qui convient pour le tournage extérieur des pièces longues et flexibles). On utilise des lunettes qui sont des supports auxiliaires. Dans ce montage, l'axe de la pièce doit coïncider en permanence avec l'axe de la broche du tour,
- Montage mixte.

La figure I.5 illustre un des différents montages à savoir le montage en lunette.

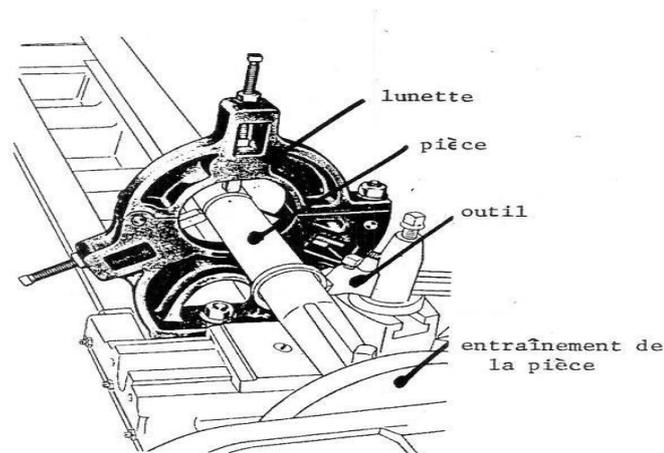


Figure I.5 : Montage en lunette.

I.3.5 L'OUTIL :

L'outil est l'intermédiaire entre la machine et la pièce à usiner.

La partie active d'un outil est foncée dans la pièce et se déplace mécaniquement par rapport à celle-ci de façon à éliminer la surépaisseur sous forme de copeau. [6].

De la même manière que la constitution des outils de coupe (coupants), les angles caractéristiques de l'outil (tournage) sont :

- Angle de dépouille α ,
- Angle de taillant β ,
- Angle de coupe γ ,
- Angle d'inclinaison de l'arête λ ,
- Angle de direction de l'arête χ_r ,
- Angle de direction complémentaire ψ_r ,
- Angle de pointe δ_r .

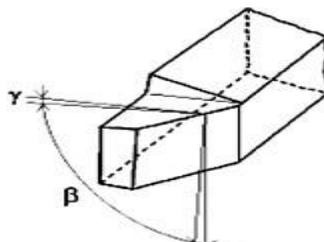


Figure I.6 : Angles de coupe

En tournage, la forme du bec influence l'état de surface. Le choix du rayon de bec est fonction de l'opération à effectuer : ébauche ou finition.

Pour le cas d'une opération d'ébauche, et afin d'obtenir une arrête de coupe résistante, il faut choisir le rayon r_b de bec le plus grand possible.

Pour le cas d'une opération de finition, l'état de surface et les tolérances qu'il est possible d'obtenir sont essentiellement fonction du rayon de bec et de l'avance. Pour des conditions d'usinage favorable, l'avance doit être utilisée avec un état de surface donné et un rayon de bec déterminé.

Ainsi, les principales formes sont : Intersection vive, rayon et plat.

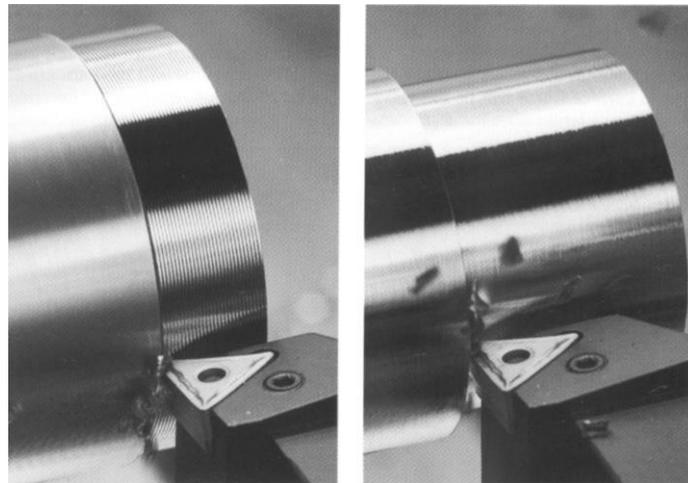


Figure I.7 : Influence du rayon du bec de l'outil sur la surface à usinée

I.3.6 FORMATION DU COPEAU :

La coupe (formation du copeau) est un processus physique complexe qui s'accompagne de déformations plastiques et élastiques ; elle donne lieu à un frottement important (outil-pièce), au dégagement de chaleur, à la formation d'une arrête rapportée (copeau adhérent sur le bec de l'outil), à l'enroulement et au retrait du copeau, au durcissement de la pièce (surface usinée écrouie) et à l'usure de l'outil (détérioration de la partie active de l'outil).

La formation du copeau joue un rôle important sur la rugosité de la surface usinée. Les formes du copeau varient suivant les conditions d'usinage.

L'usinage des métaux plastiques (aciers) donne lieu à trois types de copeaux : continu, cisailé et discontinu.

On obtient aussi le copeau fragmenté produit par l'usinage de métaux peu plastiques (fontes, bronzes,...).

- **Le copeau continu :** Il apparaît lorsque l'acier est usiné à une grande vitesse. Il s'écoule

alors en forme d'une bande longue.

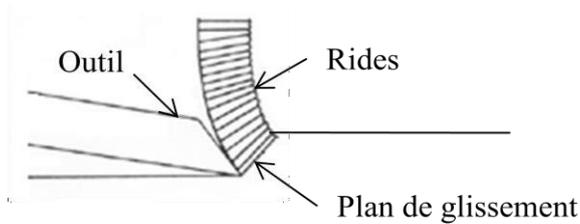


Figure I.8 : Copeau continu

- **Le copeau cisailé** : Il s'obtient lorsque l'usinage de l'acier se fait à vitesse moyenne. La face du copeau en regard de l'outil est lisse, alors que sa face opposée porte des entailles qui définissent la direction bien marquée des éléments isolés fortement liés les uns aux autres.

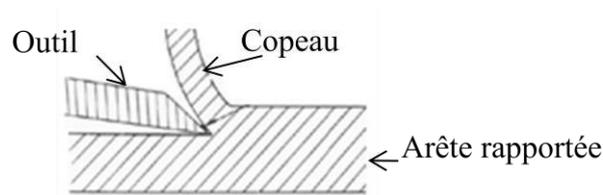


Figure I.9 : Copeau cisailé

- **Le copeau discontinu** : Il s'obtient lors de l'usinage des métaux durs et peu ductiles, à faible vitesse de coupe. Il est composé d'éléments séparés, déformés plastiquement, peu liés ou pas liés du tout entre eux.

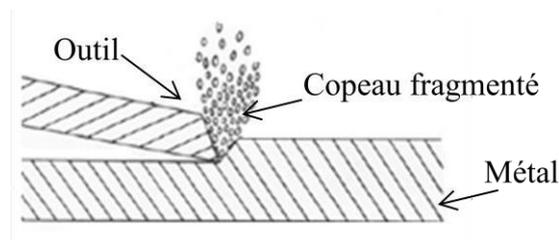


Figure I.10 : Copeau discontinu

I.4 COUPE DES METAUX :

I.4.1 Définition de la coupe des métaux :

L'usinage d'une pièce nécessite l'utilisation de machines comme le tour et la fraiseuse qui sont plus couramment utilisés pour produire une pièce selon des normes précises. Cette technique de coupe transforme une partie de la matière noble en copeaux (appelés aussi déchets) qui sont inutilisables. Malgré ses inconvénients, cette méthode de coupe transforme une partie de matériau nobles en morceaux inutilisables.



Figure I.11 : Usinage par enlèvement de matière. [2]

I.4.2 PRINCIPE DE LA COUPE DES METAUX :

La coupe des métaux (ou usinage) consiste à enlever une couche de métal pour obtenir une pièce finie conforme au dessin de définition.

Cette coupe est effectuée sur des machines à l'aide d'outils tranchants de dimensions et de formes diverses.

Lors de l'usinage, on trouve :

- Une lame d'outil qui pénètre dans la matière et enlève un copeau,
- L'outil suit une trajectoire par rapport à la pièce à usiner, où les mouvements sont assurés par les éléments constitutifs de la machine-outil. [7].

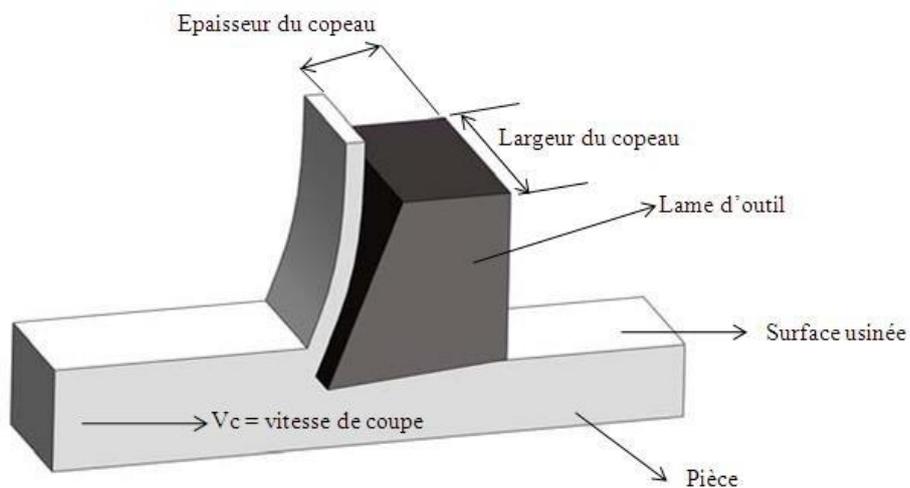


Figure I.12 : Usinage par enlèvement de matières

La conjugaison de 3 mouvements soit à l'outil ou soit à la pièce permet la coupe.

Ces 3 mouvements sont :

- Le mouvement de coupe, M_c
- Le mouvement d'avance, M_a
- Le mouvement de profondeur, M_p

Avec :

Mouvement de coupe M_c = Le mouvement de coupe est un mouvement relatif principal entre l'outil et la pièce. Il est le mouvement principal à l'élaboration du copeau pendant la course de la machine. 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.

Mouvement d'avance M_a = Au mouvement de coupe, vient s'ajouter un autre mouvement relatif entre l'outil et la pièce, le mouvement d'avance, nécessaire à la génération de la surface de la pièce. Il peut être composé de plusieurs mouvements mais seulement de façon à ce qu'au moins une de ses composantes soit rectiligne. 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. [6].

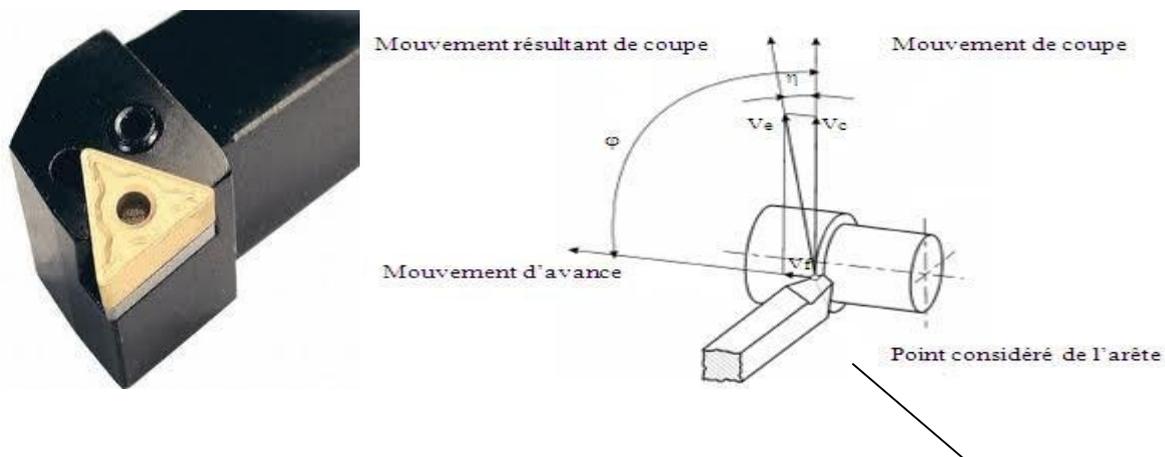


Figure I.13 : Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage

Mouvement de profondeur M_p = 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. Le mouvement de profondeur M_p est un mouvement perpendiculaire aux mouvements de coupe et d'avance. Il détermine la pénétration de l'outil dans la pièce (l'épaisseur du copeau à enlever).

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

Pour obtenir un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidité de l'usinage, usure modérée de l'outil,...), on doit régler les paramètres de coupe ; ou, il y a plusieurs critères qui permettent de définir les paramètres de coupe, comme le montre la figure I.14 :

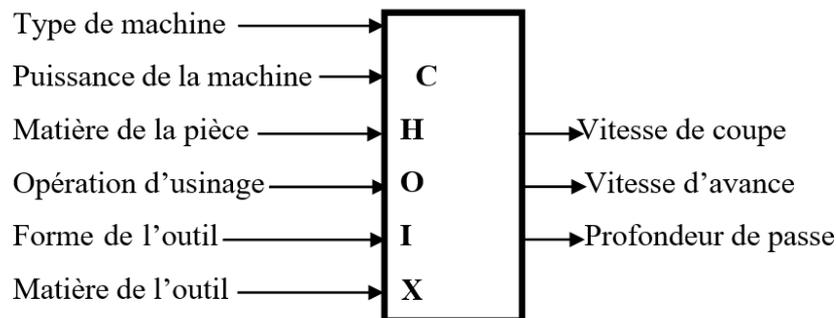


Figure I.14 : Critères permettant de définir les paramètres de coupe

Suivant le type d'opération à réaliser, il faut choisir la méthode d'usinage, et donc choisir la machine à utiliser : Tournage, fraisage ou perçage.

De ces paramètres, on peut citer :

Surépaisseur d'usinage : La partie de matière usinée entre la surface de la pièce et la surface finale désirée (après avoir effectué toutes les passes nécessaires).

Avance : Valeur du déplacement de l'arête tranchante pendant que la pièce fasse un tour (pour le tournage). Elle est déterminée par la profondeur de passe, de l'état de surface (ébauche ou finition), la nature de l'outil et suivant le déplacement de l'outil (longitudinal, transversal ou oblique).

Profondeur : est la valeur de la couche du métal enlevé (surépaisseur). Elle est déterminée

par la nature du métal à usiner et par l'épaisseur du métal à usiner (ébauche ou finition).

Usinage en ébauche : on cherche à enlever un maximum de matière en un minimum de temps.

Usinage en finition : cette fois, c'est la qualité de réalisation qui est importante. La surface doit être lisse, les cotes doivent être correctes.

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 au cours d'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**. [9][10].

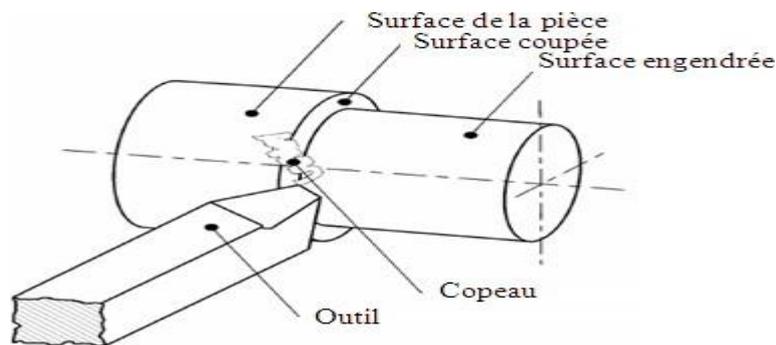


Figure I.15 : Surfaces de la pièce

I.4.3 OUTIL DE COUPE :

Les outils permettent d'enlever le copeau. La géométrie de l'outil influe directement sur les formes usinables sur la pièce.

Il existe une grande diversité d'outils de coupe. Toutefois, les principaux éléments des différents outils sont semblables. Ainsi, afin de simplifier la compréhension de différents éléments définissant un outil quelconque, nous nous baserons sur un outil de coupe en tournage. Les définitions peuvent ensuite être déduites pour tout autre type d'outil. Dans cette partie, on ne donne que les définitions nécessaires à la compréhension de phénomènes de coupe expliqués plus loin. Les définitions complètes se trouvent dans la norme ISO3002/1982.

Aussi, un outil de coupe consiste en un **corps** et une **queue**. Un corps est la partie de l'outil portant les éléments coupants ou les plaquettes. Parfois, les arêtes peuvent être taillées directement dans le corps. D'autre part, la queue de l'outil est la partie par laquelle celui-ci est maintenu.

La partie de l'outil qui intervient directement dans l'opération de coupe (les arêtes, la face de coupe et la face de dépouille) est appelée **partie active**. On y distingue différentes faces et arêtes qui sont illustrées sur la figure I.16 (les arêtes, la force de coupe et la face de dépouille). [11].

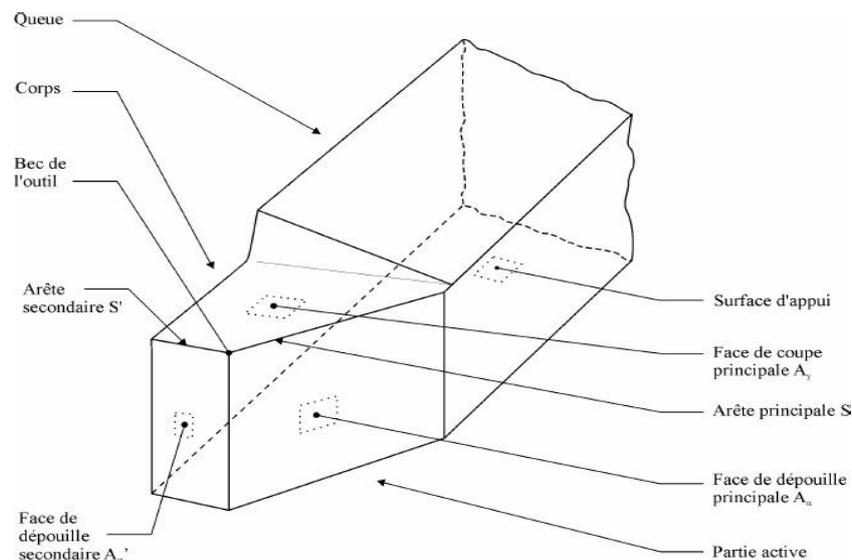


Figure I.16 : Eléments de l'outil

Avec :

Le Corps d'outil : Partie de l'outil qui porte les éléments composants l'outil (éléments coupants ou plaquettes) et qui sert à sa fixation et à sa mise en position sur la machine.

La partie active de l'outil : Partie qui intervient directement dans l'opération de coupe.

Elle est composée de la face de coupe, des faces en dépouille et des arêtes tranchantes.

La face de coupe : Surface sur laquelle glisse le copeau lors de la coupe.

La face de dépouille : Surface devant laquelle passe la surface coupée par l'outil.

L'arête tranchante principale : Arête tranchante destinée à l'enlèvement de la matière. Elle résulte de l'intersection de la face de coupe A_y et de la face en dépouille principale A_α .

L'arête tranchante secondaire : Arête qui commence à l'extrémité de l'arête principale et qui s'étend dans une autre direction. Elle résulte de l'intersection de la face de coupe A_y et de la face en dépouille secondaire $A_{\alpha'}$.

Le Bec d'outil : Partie où se rejoignent l'arrête principale et l'arrête secondaire. Cette partie peut être droite, arrondie, ou vive

La partie de l'outil impliquée directement dans la coupe est appelée taillant. Elle est limitée par trois faces : la face de coupe le long de laquelle glisse le copeau et les deux faces de dépouille (principale et secondaire) le long desquelles passent les surfaces coupée et engendrée.

On appelle une **arête** un bord de la face de coupe destiné à l'enlèvement de matière. Dans un outil de tournage simple, on peut distinguer une arête principale, intersection entre la face de coupe et la face de dépouille principale, et une arête secondaire, intersection entre la face de coupe et la face de dépouille secondaire. La jonction des arêtes principale et secondaire forme le bec de l'outil. Il peut être droit, arrondi ou représenter l'intersection vive des deux arêtes.

Pour faciliter l'explication des phénomènes de la coupe il est nécessaire de définir les angles ayant la plus grande influence sur les dits phénomènes.

La figure II.6 illustre, dans le système de référence outil en main, les trois angles principaux du taillant :

- **Angle de dépouille α ,**
- **Angle de taillant β ,**
- **Angle de coupe γ .**

Ces angles sont dans les systèmes de référence outil en travail : outil à taille en bout (gauche) et outil à taille de côté ou latérale (droite).

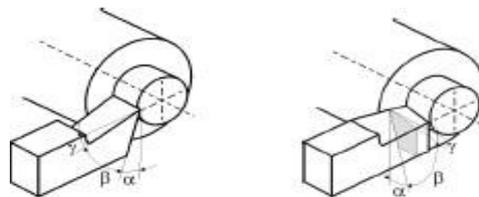


Figure I.17 : Angles du taillant (outil en travail)

Globalement, l'angle de dépouille α influe sur le frottement entre l'outil et la pièce et donc la durée utile de l'outil. L'angle de coupe γ a une influence sur la manière dont s'écoule le copeau sur la face de coupe et ainsi les efforts de coupe, la puissance consommée, les dégagements de chaleur etc. L'angle de taillant β affecte la résistance à la rupture du taillant. La somme de ces trois angles est toujours égale à 90° .

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

Dans le cas où la somme de α et de β est supérieure à 90° , on parle de coupe négative (γ négatif).

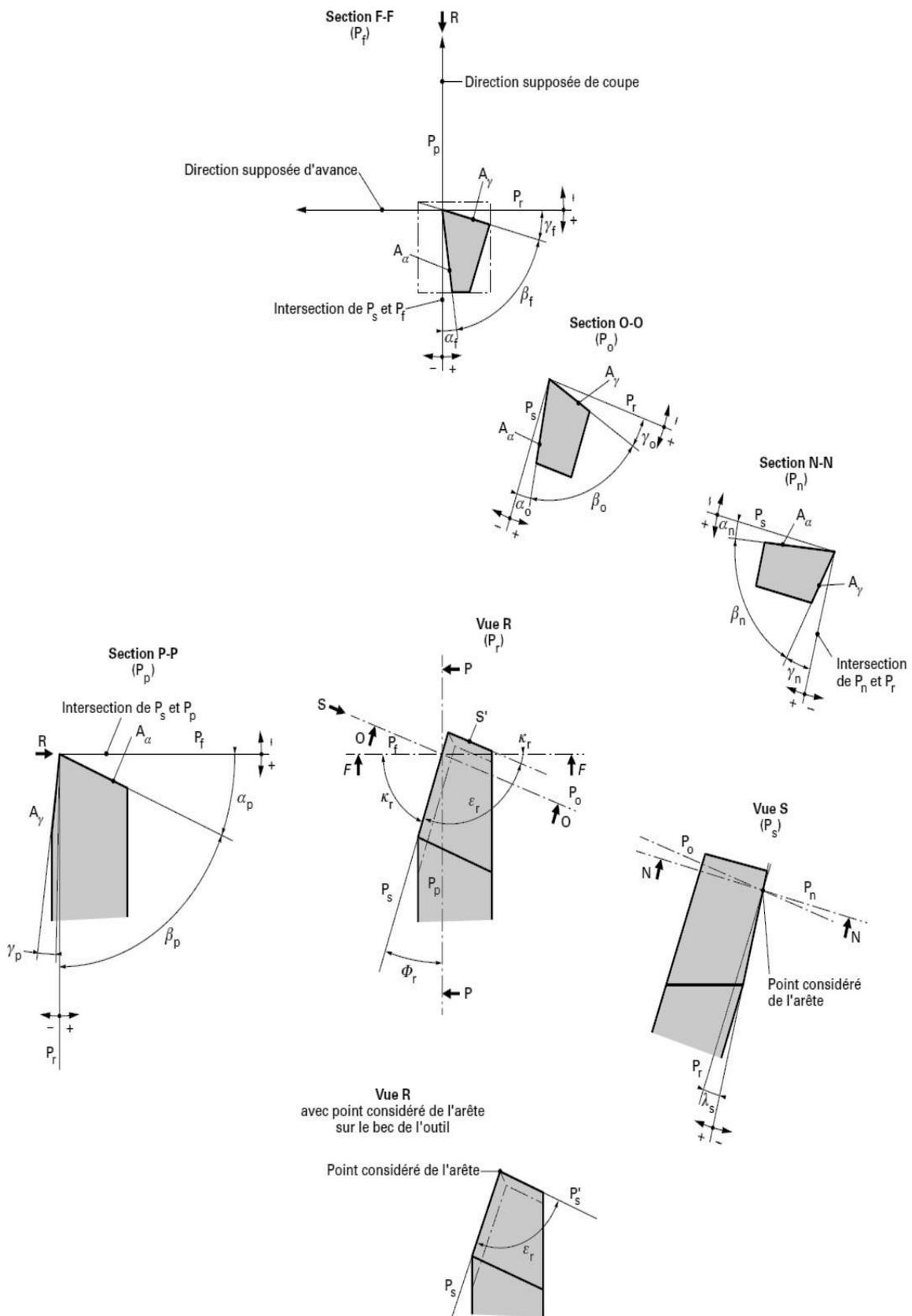


Figure I.18 : Plans et angles en main sur les outils courants : outil à chariotier droit (NF E 66-502)

I.4.3.1 Plan 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.

I.4.3.2 Angles de l'outil :

Angles d'arête de l'outil en main :

- Angle de direction d'arête de l'outil kr : angle aigu mesuré dans le plan de référence **Pr** entre le plan d'arête **Ps** et le plan de travail **Pf**. Il est mesuré de **Pf** vers **Ps** et dans le sens où la trace de **Ps** dans **Pr** s'éloigne du bec de l'outil.
- Angle d'inclinaison d'arête de l'outil λ_s : angle aigu mesuré dans le plan d'arête **Ps**, entre l'arête et le plan de référence **Pr**. Il est positif lorsqu'en s'éloignant de la pointe de l'outil l'arrêt se trouve en dessous du plan **Pr**.
- Angle de pointe de l'outil ϵ_r : C'est l'angle mesuré dans le plans **Pr**, entre le plan d'arête **Ps** et le plan d'arête secondaire **Ps'**.
- Angle de direction d'arête secondaire de l'outil kr' : C'est l'angle, mesuré dans le plan **Pr**, entre le plan conventionnel de travail **Pf** et la projection de l'arête secondaire dans le plans de référence de l'outil **Pr**.

Les angles de direction d'arête de l'outil, de pointe de l'outil et de direction d'arête secondaire de l'outil sont liés par la relation : $kr + \epsilon_r + kr' = 180^\circ$

Angle d'arrête de l'outil en travail :

- Angle de direction d'arête en travail k_{re} : c'est l'angle mesuré dans le plan **Pre**, entre les plans **Pfe** et **Pse**. La convention de sens adoptée pour k_{re} est la même que pour l'angle k_r .
- Angle d'inclinaison d'arête en travail λ_{se} : c'est l'angle mesuré dans le plan **Pse**, entre l'arête et le plan **Pre**. La convention de signe pour l'angle λ_{se} est la même que pour l'angle λ_s

Dans un même plan de section, que ce soit dans le système de l'outil en main ou de l'outil entravail, ces trois angles sont liés par la relation : $(\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ)$

Ces angles sont définis selon le besoin dans un des plans de section 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})

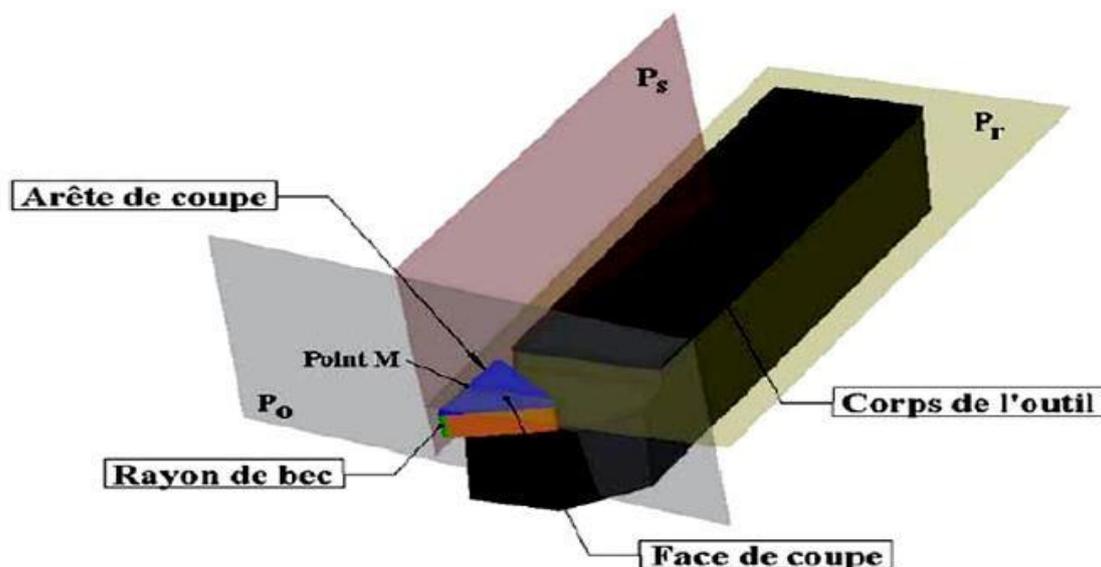


Figure I.19 : Définition de base d'un outil en tournage [12]

I.4.3.3 La géométrie de l'arête :

Usuellement dans les modèles de coupe la partie active de l'outil est définie par trois plans sans raccordement.

En réalité, la zone de coupe de l'outil est constituée de trois plans raccordés par deux rayons : le rayon de bec R_e et le rayon d'acuité R de l'arête de coupe, qui est souvent négligé dans un grand nombre de modèles.

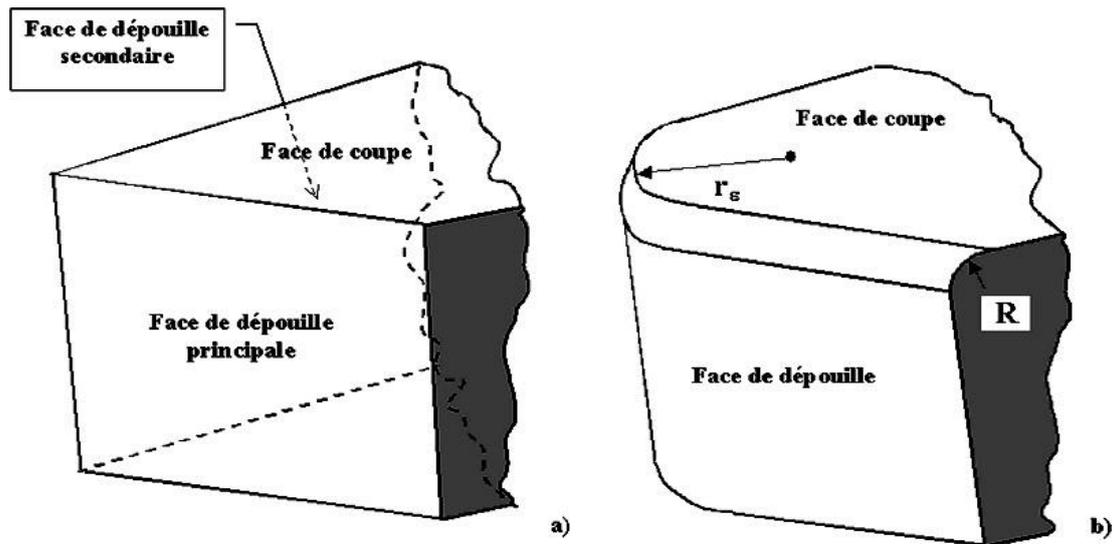


Figure I.20 : Géométrie de l'arête de coupe

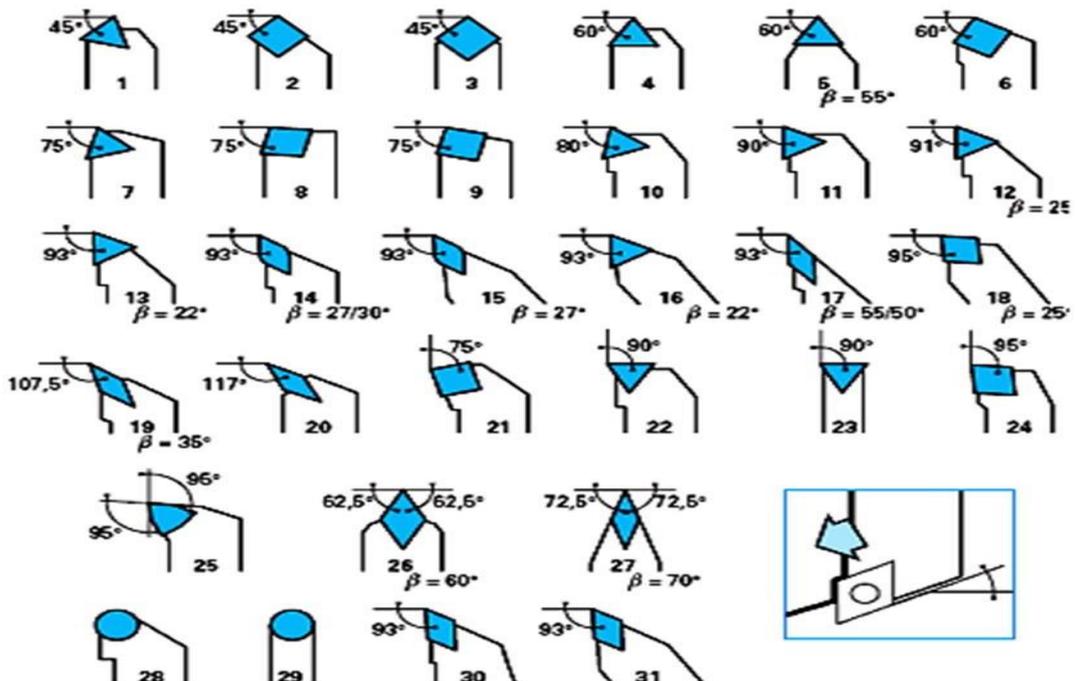


Figure I.21 : Gamme des angles d'orientation d'arête

I.4.3.4 MATERIAUX DES OUTILS DE COUPE :

Pour résister aux sollicitations sévères que le tranchant de l'outil subit dans la coupe, la partie de celui-ci doit être constituée d'un matériau présentant des qualités particulières :

- Une dureté élevée pour pouvoir pénétrer dans le métal usiné.
- Une résistance mécanique élevée (particulièrement à la compression) pour résister aux efforts de coupe.
- Une résistance aux chocs pour éviter l'écaillage de l'arête de coupe (croûte de la matière usinée que se dépose sur le bec de l'outil, en formant une deuxième arête tranchante), elle détériore l'état de surface et crée un échauffement plus accentué de la partie active.
- Une résistance au frottement suffisamment élevée pour limiter les efforts d'usure sur les faces de coupe et de dépouille.
- Une conservation de la dureté à des températures élevées (500 à 4400°C).

Un bon fini de la face d'attaque et de dépouille pour respecter l'état de surface demandé (un bon pierrage après chaque affûtage est souhaitable).

Un bon outil doit permettre un maximum de rendement pour un minimum d'usure.

I.4.4 LES PARAMETRES DE COUPE :

Les paramètres de coupe en tournage sont divisés en paramètres cinématiques qui montrent les déplacements de la pièce et de l'outil de coupe et paramétriques géométriques qui montrent les valeurs des surépaisseurs et des dimensions de coupe.

Dans la production industrielle, la détermination des paramètres de coupe est cruciale car, par exemple, les régimes réduits augmentent considérablement le temps d'exécution de la pièce à usiner et augmentent le prix de revient. Pour y parvenir, les paramètres choisis doivent être les meilleurs pour garantir un prix de revient minimum pour la pièce à usiner tout en augmentant la productivité.

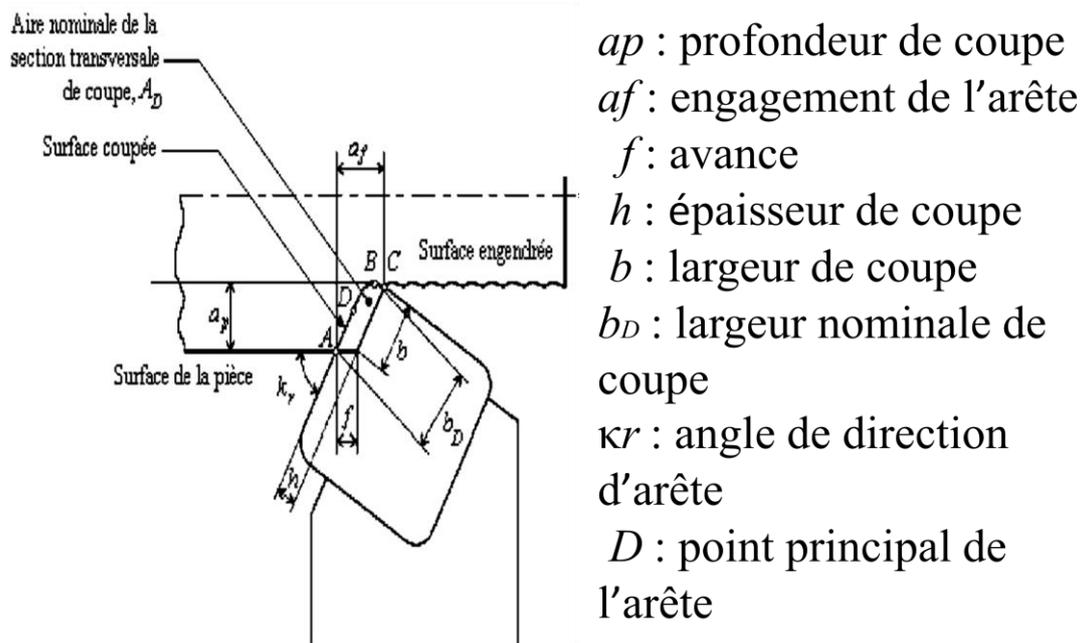


Figure I.22 : Dimensions des angles de coupe dans le de tournage

I.4.4.1 VITESSE DE COUPE (VC) :

C'est le déplacement d'un point de l'arête tranchante de l'outil par rapport à la surface de coupe en une unité de temps.

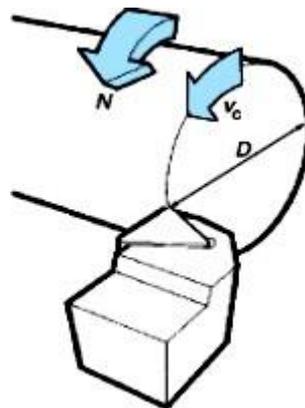


figure I.23 : Vitesse de coupe

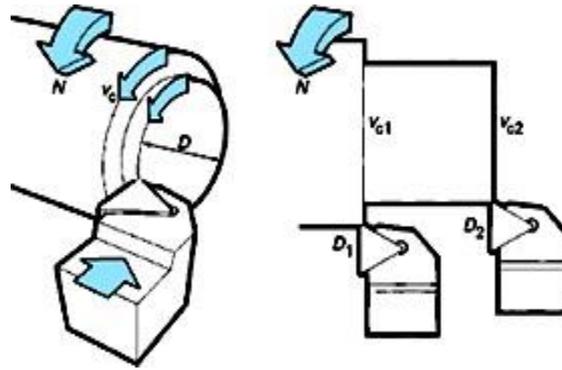


Figure I.24 : Vitesse de coupe, diamètre et vitesse de rotation

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.

Pour une productivité maximale et une meilleure qualité des surfaces obtenues, il est souhaitable de maintenir la vitesse de coupe constante. Cette vitesse est choisie en fonction, notamment des matériaux de la pièce et de l'outil, la lubrification et de la durée de vie souhaitée pour l'outil.

En désignant par D le diamètre du cercle décrit en millimètres (mm), par N la vitesse de rotation en tour par minutes (tr/min) et par V_c la vitesse linéaire en mètre par minute (m/min), on a :

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \text{ (m/min)}$$

Le mouvement de coupe anime principalement la pièce (pièce tournante). On en déduit la vitesse de coupe V_c , qui déterminera la vitesse de rotation de la pièce que l'on doit régler sur la machine.

$$N = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \text{ (tr/min)}$$

I.4.4.2 VITESSE D'AVANCE (V_f) ET AVANCE/TOUR (F) :

La vitesse d'avance V_f , 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].
[13]

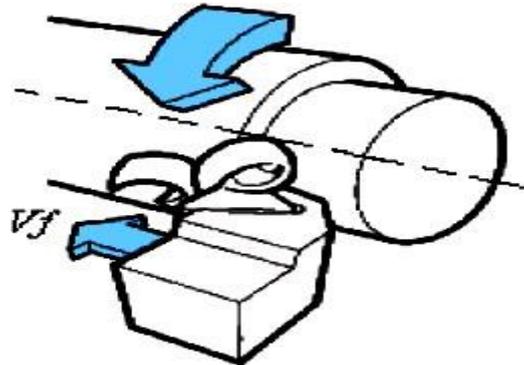


Figure I.25 : Vitesse d'avance

L'avance notée f correspond à la différence de déplacement de l'outil entre deux itérations ou deux révolutions (une révolution de la pièce dans le cas du tournage).

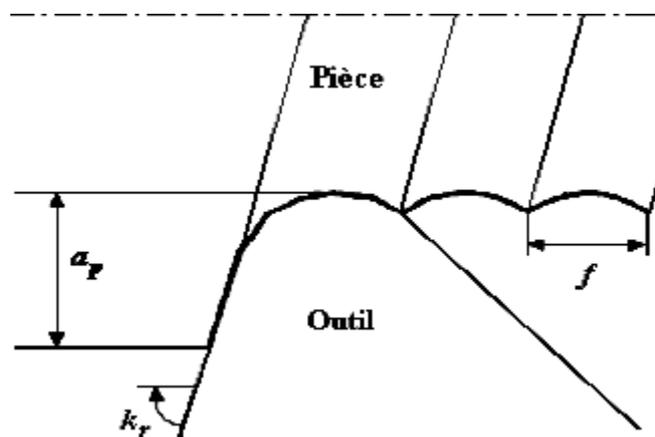


Figure I.26 : Avance f dans le cas de tournage

I.4.4.3 PROFONDEUR DE PASSE :

La profondeur de passe notée a (mm) correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas du tournage.

La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil.

I.5 CONCLUSION :

Ce chapitre est composé de deux parties, Le premier chapitre de notre recherche bibliographique a montré qu'il est nécessaire de connaître l'évolution du procédé d'usinage ainsi que toutes les étapes importantes lors du processus de fabrication. Les différents procédés d'usinage ont été cités du fait que notre travail s'est concentré sur une opération du procédé de tournage.

La deuxième partie de notre recherche bibliographique a montré l'importance de la coupe des métaux qui parfois est difficilement réalisable car d'une part, elle est sujette aux conditions de coupe et d'autre part, les paramètres de coupe utilisés lors de l'usinage influent d'une manière importante sur l'état de surface.

II. CHAPITRE 2 : LA RUGOSITE

II.1 Introduction :

Plusieurs recherches ont été menées pour identifier les facteurs influençant l'état de surface et le comportement tribologique des pièces dans un mécanisme. Il a été démontré que la qualité des surfaces en service et les procédés de fabrication des pièces mécaniques sont liés. Les techniques de finition des surfaces des pièces ont évolué considérablement ces dernières années [14], mais le premier souci des fabricants est d'obtenir des pièces de qualité qui répondent aux exigences techniques et fonctionnelles tout en réduisant les coûts de fabrication [15].

Cette étude démontre l'importance et l'impact du processus de finition des surfaces sur la qualité. Les méthodes suivantes ont été utilisées pour terminer trois surfaces :

Le tournage est fréquemment utilisé en raison de sa grande productivité, de la disponibilité de l'outillage et de son coût relativement bas.

La rectification améliore la qualité de la surface, mais reste toujours une méthode de finition extrêmement coûteuse. Le brunissage, également connu sous le nom de galetage à la bille, est une technique de finition par déformation plastique superficielle qui est très efficace et peu coûteuse. Il possède de nombreux avantages, notamment l'amélioration de l'état de la surface et les caractéristiques mécaniques de la surface.

II.2 Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface :

La fonction, la rugosité, la géométrie et l'aspect des surfaces usinées sont indiqués par l'état de surface d'une pièce en mécanique [16]. La géométrie de l'outil de coupe, l'avance et les vibrations relatives entre l'outil et la pièce sont les facteurs les plus influents sur l'état de surface d'une pièce mécanique [17]. (La figure 1) montre les différents facteurs qui peuvent affecter l'obtention de l'état de surface souhaité lors de l'usinage à l'aide de la méthode Ichikawa.

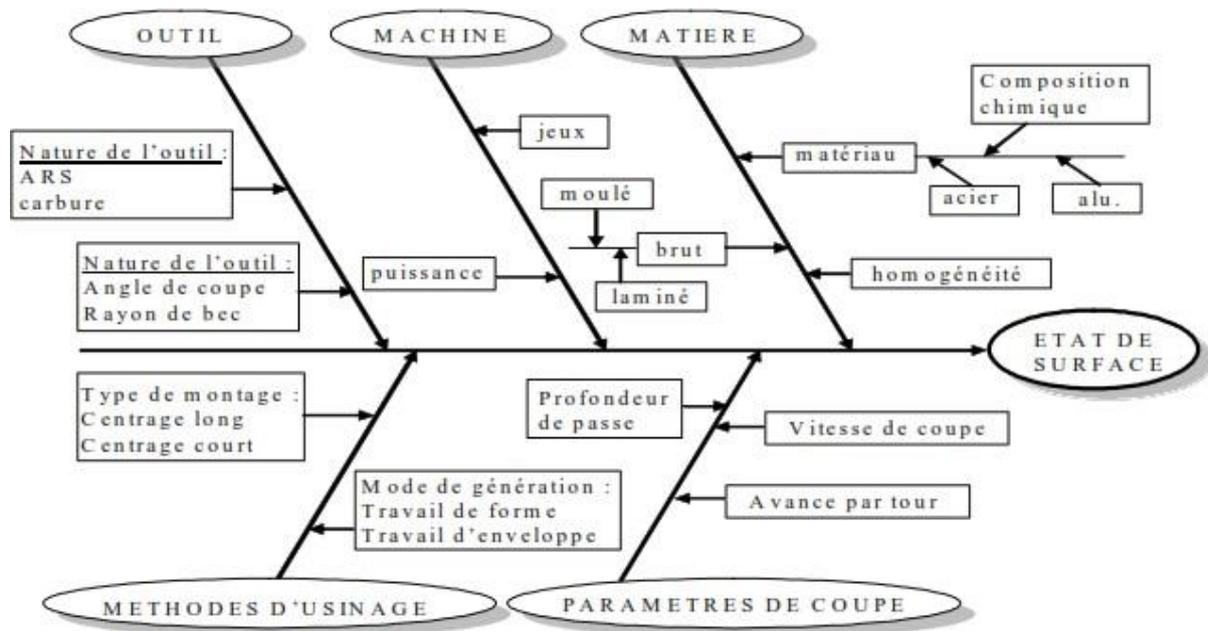


Figure II.1 : Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface [17]

II.3 Principaux défauts de surface :

La capacité d'une pièce à exécuter une tâche spécifique dépend d'un certain nombre de facteurs, en particulier les caractéristiques de ses états de surface. Les défauts de surface sont généralement cruciaux pour la capacité d'une pièce à exécuter une tâche spécifique. Ces lacunes sont géométriques ou physicochimiques. Il ne s'agit ici que des défauts géométriques, qui sont généralement classés en quatre numéros d'ordre (figure 2) [18].

- Les défauts du premier ordre comprennent des défauts de forme tels que des écarts de rectitude ou de circularité, ainsi que des défauts a périodiques.
- Les défauts du deuxième ordre comprennent : La ligne ondulée à caractère périodique est principalement due aux vibrations de basse fréquence de la pièce et de l'outil générateur.
- Les défauts du troisième et quatrième ordre sont les suivants : Les défauts du troisième ordre, qui sont constitués de stries ou de sillons, ont un caractère périodique ou pseudo périodique. Cependant, les défauts du quatrième ordre peuvent inclure des arrachements, des fentes, des piqûres, etc. Ce genre de défaut est a périodique.

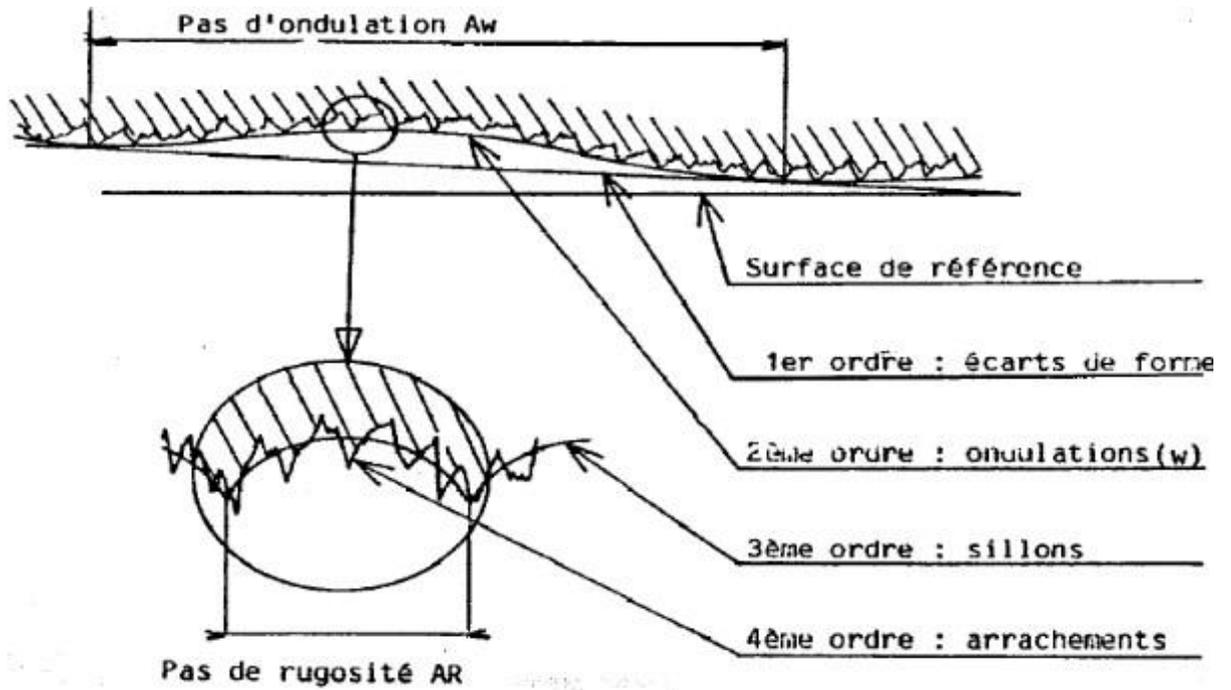


Figure II.2 : Principaux défauts de surface [18]

II.4 Rugosité :

C'est l'ensemble des anomalies sur une surface qui présentent des traits micrographiques et macrographiques. Les surfaces usinées peuvent présenter des irrégularités en raison des procédés d'usinage, des outils, de la matière, etc.

La fonction d'une surface est influencée par divers facteurs, tels que son état (étanchéité, glissement, etc.).

L'état de surface est plus difficile à obtenir lorsque l'indice de rugosité est faible, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication. [15]

II.5 Principaux critères de rugosité :

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage (figure 3) soit OX la ligne moyenne tel que :

$$\int_0^1 y \, dx = 0 \dots \dots \dots (1)$$

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne [20].

II.5.1 Rugosité totale Rt :

Rt représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil.

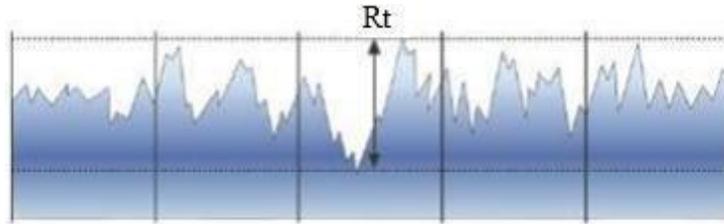
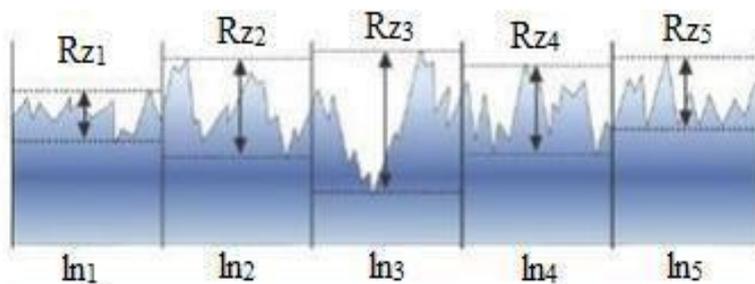


Figure II.3 : Rt Hauteur de profil totale [21]

II.5.2 Rugosité Rz :

Rz représente la distance moyenne entre les cinq sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas (figure 4).



$$R_z = \frac{R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}}{5}$$

Figure II.4 : Rz Hauteur de profil maximum (moyenne) [21].

II.5.3 Rugosité moyenne arithmétique Ra :

Ra représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à OX (figure 5).

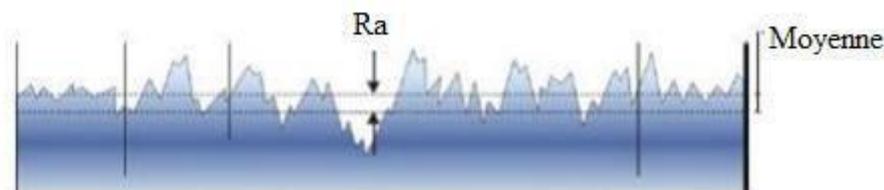


Figure II.5 : L'écart moyen arithmétique du profil (Ra) [21]

Ra est calculé sur une longueur d'évaluation (Figure 6) :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx \dots \dots \dots (2)$$

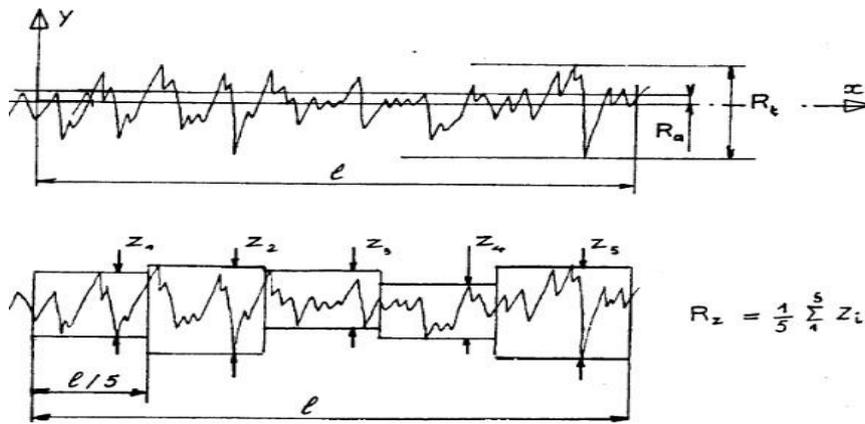


Figure II.6 : Principaux critères de rugosité [21]

II.6 Evaluation de la rugosité :

Théoriquement la connaissance de l’avance f ainsi que la géométrie de l’outil permet de calculer la profondeur maximale des sillons marqués sur la surface usinée.

En tournage par exemple, la rugosité totale de la surface R_t obtenue peut être déterminée à partir d’un profil géométrique idéal donné par la figure 7 [18, 22].

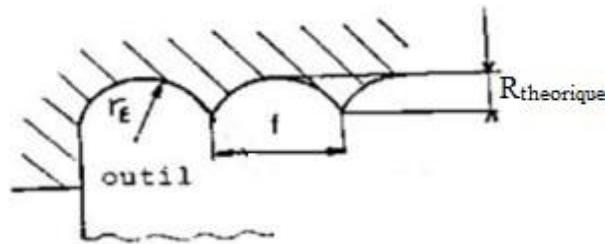


Figure II.7 : Sillons théoriques [18]

$$R_{t_{theorique}} = r_s \left[1 - \sqrt{1 - \frac{f^2}{4 r_s^2}} \right] \dots \dots \dots (3)$$

Avec : r_s c’est le rayon de pointe d’un outil.

Dans le cas où l’avance serait suffisamment petite devant la valeur de r_s . (6) pourrait être remplacée par l’approximation :

$$R_{t_{theorique}} \approx \frac{f^2}{8 r_s} \dots \dots \dots (4)$$

Pour les faibles avances, le phénomène de copeau minimum prend place et il se traduit par un refus de coupe de l’outil ce qui donne lieu à un copeau de faible épaisseur. Dans ce cas, la rugosité totale réelle R_t est bien supérieure à R_t (théorique). Par contre, pour les avances élevées, les irrégularités découlant de la coupe deviennent faibles par rapport aux sillons théoriques ce qui donne une rugosité totale réelle R_t qui se rapproche de R_t (théorique). A partir de l’équation (7), une approximation largement utilisée pour évaluer la rugosité moyenne arithmétique (R_a) se présente sous la forme [23] :

$$R_{t_{theorique}} \approx \frac{f^2}{32r_s} \dots\dots\dots (5)$$

En utilisant un certain nombre d’expériences, il est possible de mettre au point expérimentalement des relations mathématiques entre la rugosité obtenue par usinage et les paramètres usuels de coupe [20]. Ces relations sont généralement de la forme :

$$R = c \cdot V^\alpha \cdot f^\beta \cdot a_p^\gamma \dots\dots\dots (6)$$

Avec : Les coefficients α , β , et γ indiquent respectivement l’influence de chacun des paramètres (V_c , f et a_p) sur la rugosité. Les coefficients déterminés pour les conditions expérimentales choisies. En général, $\gamma \approx 0$ et pour un matériau et un outil bien spécifié, il vient que :

$$R = c \cdot f^\beta \cdot V c^\alpha \dots\dots\dots (7)$$

Ou : C c’est une constante et $\beta > 0$ et $\alpha < 0$

II.7 Les spécifications normalisées :

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

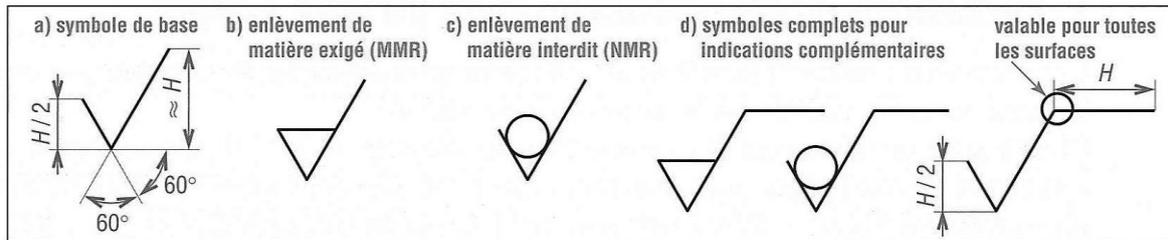


Figure II.8 : symbole graphique de l'état de surface

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

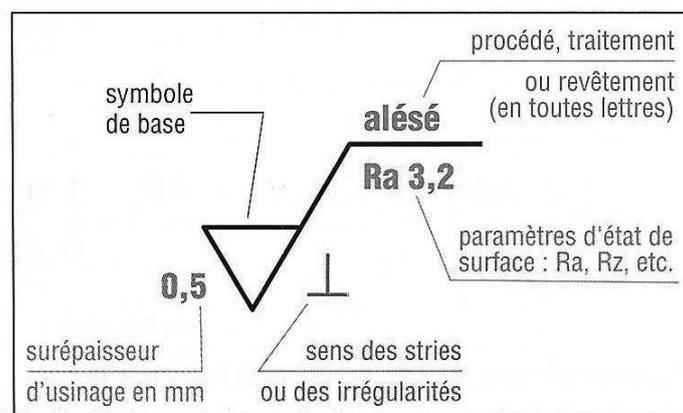


Figure II.9 : Exemple de symbolisation

II.8 Usure des outils de coupe :

L'usure est souvent définie comme la quantité de matière perdue par l'outil. Aussi l'usure des outils décrit la défaillance progressive des outils de coupe en raison d'un fonctionnement régulier. L'arête de coupe constituant l'élément actif effectuant le travail de déformation, est soumis à des sollicitations mécaniques et thermiques très sévères qui provoquent son usure et sa détérioration dans un temps relativement limité. Le frottement à l'interface copeau-outil s'effectue entre un métal naissant et l'outil à des pressions et des températures très élevées, ce qui peut donner naissance à des effets physico-chimiques aggravant l'usure de l'outil.

Dans ce contexte, nous pouvons avoir les différents types d'usures suivantes :

- Usure en dépouille,
- Usure suivant la surface d'attaque,
- Fissuration de l'arête,
- Rupture (cassure) de la pointe,
- Déformation plastique,

- Entaille,

II.8.1 Usure en dépouille :

Ou usure frontale due aux frottements de la surface de coupe de la pièce sur la surface en dépouille de l'outil. Elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête tranchante de l'outil figure 10 (a).

II.8.2 Usure suivant la surface d'attaque :

Elle se caractérise par une cuvette dite "cratère " formée sur la surface d'attaque de l'outil suite au frottement du copeau sur celle-ci figure 10 (b). Cette forme d'usure est due à l'existence des températures élevées au contact du copeau et de l'outil provoquant une diffusion importante. Cette usure peut jouer un rôle important quand à l'enroulement et la fragmentation du copeau.

II.8.3 Fissuration de l'arête :

On observe l'apparition de fissures sur l'arête coupante dans le cas des usinages avec des chocs mécaniques ou thermiques, ou avec des vibrations périodiques des efforts provoqués par une coupe discontinue. Elle est propre aux outils en carbure métalliques figure 10 (c).

II.8.4 Rupture (cassure) de la pointe :

C'est la destruction totale du bec de l'outil (Observée dans le cas des outils en acier rapide), figure 10 (d).

II.8.5 Déformation plastique :

La pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des hautes pressions dans la zone de coupe.

Cette déformation de la pointe de l'outil influe sur sa géométrie et par conséquent sur la précision et l'état de surface usinée, figure 10 (e).

II.8.6 Entaille :

Dans certaines conditions de coupe, il se produit des arrachements, l'arête tranchante à la hauteur du diamètre périphérique s'use et il y a un effondrement à cet endroit. L'entaille est due à des passages successifs de l'outil sur une couche écrouie par le passage précédent, donc plus dure, figure 10 (f). [6].

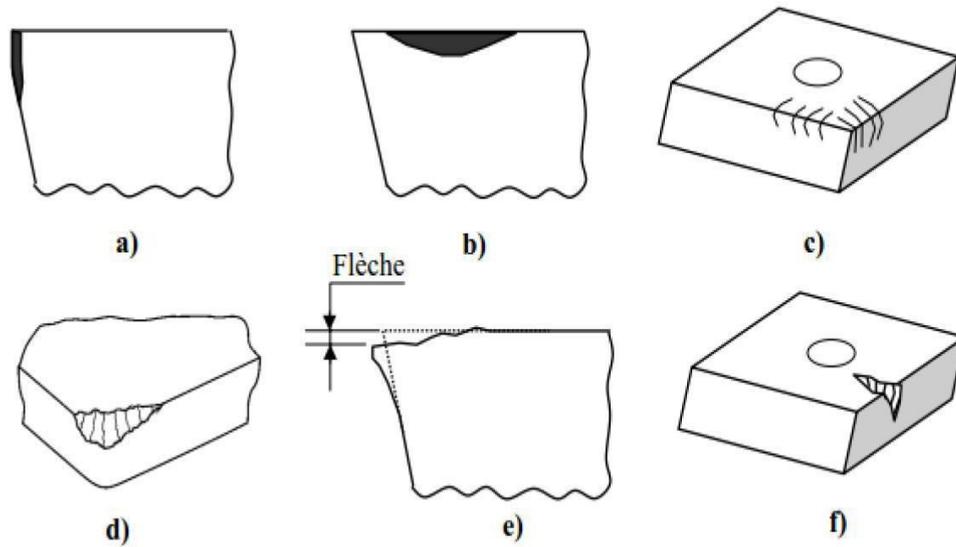


Figure II.10 : Formes d’usure sur les outils de coupe

Différent valeur de rugosité sur les matériaux suivant :

Matériaux	k Rugosité en [mm]
Cuivre étiré	0,001 – 0,002
Laiton	0,001 – 0,002
Plomb	0,001 – 0,002
Aluminium	0,002
Verre	0,001 – 0,002
Polyéthylène – PE	0,002
Acier étiré sans soudure : neuf	0,05
Acier étiré sans soudure : rouillé	0,2
Acier étiré sans soudure : eau chaude de chauffage	0,1
Acier étiré sans soudure : entartré	0,4
Acier galvanisé : neuf	0,15
Tôle galvanisée pour gaine de climatisation et de ventilation	0,150
Fonte : neuve	0,1
Fonte : usée	1 – 1,5
Béton lisse	0,5
Béton armé	2,5
Béton rugueux	5

Figure II.11 : Tableau des rugosités [26].

II.9 Mesure de la rugosité :

Dès 1919, le développement des instruments de mesure de surfaces a commencé avec un dispositif mécanique simple attribué à Schmalz, qui a été le premier instrument destiné à l'utilisation en engineering. Berndt a proposé en 1924 l'utilisation des techniques optiques pour mesurer la surface, mais Andrews a suivi en 1928. Dans tous les pays du monde, la mesure de surface a toujours été une question importante. Limnik a développé de nouvelles méthodes spécifiques basées sur l'interférométrie pour mesurer l'état de surface depuis 1930 dans les URSS. Harrison a lancé le premier appel aux Etats-Unis à la normalisation des surfaces en 1930.

En 1933, Abatt a été appelé à créer un instrument de mesure de surface basé sur la technique de palpé. Bien qu'il ait été développé pendant plusieurs années et qu'il y ait eu des doutes quant à son utilisation au début de sa conception, cette technique est maintenant largement utilisée. Plus tard en 1935, l'analyseur de surface conçu par la Cie de développement de brosse de Cleveland a eu plus de succès que l'instrument d'Abbat car il avait un enregistreur de diagrammes. Plusieurs instruments optiques de mesure de surface ont été conçus par KARL ZEISS en Allemagne en 1934. En 1939, en Angleterre En 1940, Schlesinger a publié ses recherches sur les spécifications des surfaces appropriées et les a publiées dans des articles en 1942. Pour mesurer la planéité plutôt que la rugosité, l'autocollimateur était l'outil de mesure de surface le plus efficace [27].

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de l'état de surface, qui peuvent être classées en trois groupes en fonction de s'il s'agit d'une surface ou d'un profil. Ces méthodes sont utilisées : soit fréquemment dans l'industrie, soit avec un appareil à palpeur à contact, soit mécaniquement. Il est rare pour des utilisations particulières, comme des appareils à palpeur sans contact ou des techniques optiques ; il est encore moins courant dans les laboratoires de recherche et développement [28].

Methodes mechanical Les instruments conventionnels de mesure de surface utilisant ces méthodes présentent certains inconvénients tels que : Les méthodes mécaniques peuvent englober une vaste gamme de paramètres de rugosité en raison de leur simplicité et de leur grande diversité. Technique assez lente. Parfois, la surface peut être endommagée par la force du palpeur. limité aux zones de mesure. Les avantages sont clairs : Souplesse pour adopter une large diversité de forme. Très haute résolution dans la direction verticale [29].

II.9.1 Appareils à palpeur :

Dans l'industrie le moyen le plus utilisé est l'appareil de mesure d'état de surface à palpeur, avec contact de ce dernier sur la surface à caractériser (profilomètre mécanique 2D). Suivant son degré de perfectionnement, ce type d'équipement permet la mesure de tous ou parties des paramètres d'états de surface. En effet, l'évaluation des paramètres de profil primaire et d'ondulation nécessite une référence de guidage externe. La figure 2.1 représente, de façon schématique, un appareil à palpeur dont les différents composants sont définis ci-après [28]:

Chaîne de mesure : chaîne fermée qui comprend tous les éléments mécaniques reliant la pièce à mesurer et la pointe du palpeur.

Référence de guidage : composant de l'appareil qui génère le plan d'intersection et guide le capteur dans ce plan selon une trajectoire théoriquement exacte (profil de référence), qui est généralement une ligne droite ;

Unité d'avance : composant de l'appareil qui déplace le capteur le long de la référence de guidage, ce dernier transmettant la position horizontale de la pointe du palpeur sous forme de coordonnée horizontale du profil ;

Capteur : composant de l'appareil qui contient l'élément de palpation, avec la pointe du palpeur, et le transducteur ;

Élément de palpation : élément qui transmet le déplacement de la pointe du palpeur au transducteur ;

Pointe du palpeur : élément constitué d'un cône nominalelement circulaire ayant un angle défini et d'une extrémité nominalelement sphérique avec un rayon défini ;

Transducteur : dispositif qui convertit les coordonnées verticales du profil tracé par rapport au profil de référence en un signal utilisé dans l'appareil ;

Amplificateur : dispositif qui effectue une transformation du signal dans l'appareil sans provoquer de modification intentionnelle du profil ;

Convertisseur analogique-numérique (ADC) : dispositif qui convertit le signal de l'appareil en valeurs numériques.

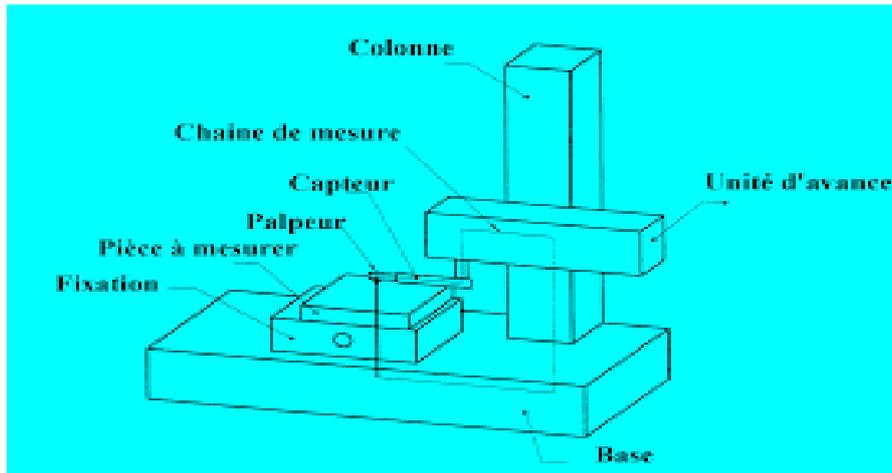


Figure II.12 : Représentation schématique d'un appareil à palpeur

II.9.2 Principe de mesure :

Un convertisseur inductif différentiel (transducteur) transforme en une tension proportionnelle la composante verticale des mouvements d'un palpeur qui se déplace sur la surface rugueuse. Le profil de la surface analysée est enregistré. Le capteur est associé à un ensemble électronique qui effectue l'amplification, l'échantillonnage, l'acquisition et la conversion du signal, il est alors transmis vers un micro-ordinateur, qui calcule les paramètres de rugosité [30]. Cet instrument a fait l'objet de nombreuses publications qui décrivent des possibilités d'amélioration de ses performances. La sensibilité peut être abaissée à quelques centièmes de nanomètre et le bruit instrumental à 0.03 nm. Le stylet (pointe de palpeur) peut avoir diverses formes et en particulier, celle d'un cône dont la pointe a un rayon de 0.5 μm . la force d'appui bien réglée, peut être inférieure à 10 μN

La résolution spatiale dépend de la pente des défauts et de la géométrie du stylet ; elle a une limite théorique de 0.1 μm . la fidélité de mesure (écart entre deux mesures consécutives sur la même zone d'un échantillon) est de l'ordre de quelques centièmes de nanomètre sur la valeur rms de la rugosité [30].

II.9.3 Le rugosimètre :

Le rugosimètre est un instrument de mesure avec contact. Son palpeur parcourt la surface à mesure afin d'en extraire différentes mesures concernant les paramètres de rugosité et d'ondulation dans certains cas.

Les rugosimètres sont des instruments maniables à faible investissement, ce qui en fait l'un des

appareils les plus accessibles pour inspecter les surfaces de vos produits. Il existe toutefois différents types de rugosimètre.

II.9.3.1 Le rugosimètre avec patin :

C'est l'entrée de gamme. Le palpeur de cet appareil est guidé par un patin, de cette manière, il ne permet de mesurer qu'une surface plane. Avec un patin, le palpeur ne peut mesurer que les paramètres de rugosité. Le patin permet de guider le palpeur, mais sa présence peut affecter l'exactitude de la mesure sur certain type de surface. Toutefois, le patin rend l'appareil robuste et facile à transporter.



Figure II.13 : Rugosimètre avec patin

II.9.3.2 Le rugosimètre sans patin:

À l'inverse, les rugosimètres avec palpeur sans patin utilisent un guide interne de l'appareil pour contrôler le palpeur. Ce guide interne est capable de gérer des surfaces plus complexes.

Les rugosimètres sans patin sont souvent un choix préférable puisque le guide interne permet au palpeur d'obtenir de bien meilleurs résultats C'est également un excellent choix pour effectuer des mesures sur des empreintes Plastiform



Figure II.14 : Rugosimètre avec patin.

II.9.4 Mesure tridimensionnelle :

La caractérisation de l'état d'une surface ne peut se limiter à l'analyse d'une trajectoire. L'objectif recherché est la caractérisation et l'analyse de l'intégralité d'une surface ou d'une portion de surface est pour connaître son relief, sa texture et ses défauts de surface. Les avancées technologiques repoussent toujours la connaissance et la mesure des états de surface. Ces dernières années ont vues un grand développement d'équipements destinés à la quantification de la topographie de surface, grâce à l'évolution : des appareils de mesure à contact (ajout d'un troisième axe de mesure). de la microscopie à haute résolution. du traitement de l'information et du traitement d'image. La mesure tridimensionnelle des états desurface dépasse le cadre du contrôle qualité des surfaces sur des produits industriels. L'image tridimensionnelle permet d'augmenter les possibilités d'analyse de la texture des surfaces. Elle est destinée davantage à la recherche et à l'expertise et permet ainsi d'optimiser la fonction pour laquelle est destinée une surface, frottement, adhérence, étanchéité, lubrification, écoulement, etc. Les problèmes rencontrés dans la mesure du profil de surface sont négligeables par rapport à ceux rencontrés dans la mesure tridimensionnelle qui sont communs à tous les instruments et sont comme suit :

- Maintenir des données de la hauteur précise entre les trajectoires.
- Adopter un model numérique approprié.
- Adopter un model d'échantillonnage qui permet a assez de zones d'être suffisamment couvertes avec un temps et un prix raisonnable.
- Maintenir une résolution suffisante pour détecter les défauts et autres caractéristiques non-standards [31]



Figure II.15 : Appareille de mesure tridimensionnelle

II.9.5 Profilomètre laser :

Ces méthodes sont très proches de la méthode par contact, à savoir qu'elles nécessitent l'exploration de la surface au moyen d'une série de trajectoires parallèles régulièrement espacées par déplacement de l'échantillon ou de la source. Les coordonnées Z sont acquises à l'aide d'un capteur optique à source laser. La méthode peut être coaxiale ou basée sur le principe de la triangulation suivant que le faisceau émis et le faisceau réfléchi suivent le même trajet ou une trajectoire différente. La figure 2.3 illustre le principe d'un profilomètre laser. La méthode coaxiale nécessite un système de déplacement vertical permettant l'asservissement du point de focalisation du faisceau laser sur la surface. L'exploitation des données, calcul des paramètres et visualisation de la surface, se fait avec les mêmes outils que ceux utilisés par la méthode avec contact [28].



Figure II.16 : Profilomètre laser

II.9.6 Méthodes de mesure interférométrique :

L'interférométrie est habituellement utilisée pour la mesure d'une longueur donnée par comparaison de deux chemins optiques. La figure 16 montre d'une façon simplifiée ce principe

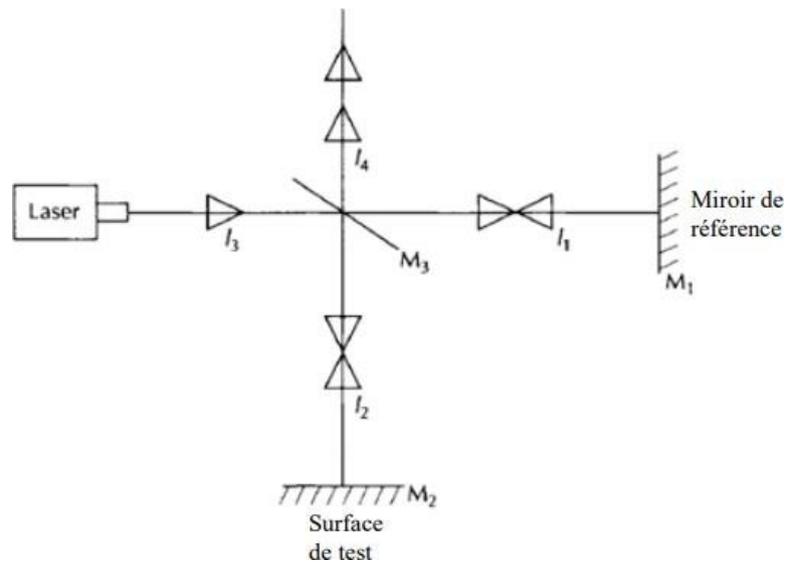


Figure II.17 : Principe de mesure interférométrique

La lumière d'une source est divisée à l'aide d'un miroir séparateur, une partie du faisceau est dirigé sur la pièce, l'autre sur un miroir de référence. Après réflexion, les deux faisceaux sont de nouveau superposés au niveau du miroir séparateur. Le chemin de référence est $l_3 + l_1 + l_4$ tandis que le chemin d'essai (à mesurer) a une longueur $l_3 + l_2 + l_4$, la comparaison doit se faire entre l_1 et l_2 et leur combinaison dépend de leurs différences de phase parfois en les additionnant et parfois en les soustrayant sous une lumière cohérente. Si le miroir M_1 est fixe, la longueur l_2 peut être déterminée en comptant le nombre de maxima vue par l'œil, chaque maxima correspond à une différence de marche de $\lambda/2$ entre l_1 et l_2 , le balayage des deux miroirs M_1 et M_2 est normal (perpendiculaire) [32].

II.9.7 Méthode de tolansky :

Tolansky [Tol48] a placé un bloc de verre plat dont il a recouvert la face inférieure d'une couche uniforme d'argent qui est le miroir de référence M_1 sur une surface de test M_2 qui peut être considéré comme une succession de miroirs sur toute sa longueur (voit Fig. 17 (a) et Fig. 17 (b)) Supposons que le miroir à tester a autant de miroirs de références situé juste au dessus, chaque pair de miroir correspond à la mesure interférométrique qu'on a vue précédemment (Fig. 16). Cette configuration produit des maxima d'intensité ou la différence de chemin optique entre le bloc de verre et la surface est en phase produisant une ligne de contour dans le plan XY. En outre, il peut y avoir des réflexions multiples entre chaque surface M_1 et M_2 , cela renforce le signal et réduit le niveau de bruits. La figure 17 (c) montre une vue schématique et la figure 17 (d) montre la manière de produire les franges ressemblant au profil. Cette méthode ne fonctionne qu'avec les surfaces relativement rugueuse et qui reflète assez bien la lumière. Pour chaque forme d'onde moyenne six à huit miroirs peuvent être pris en

considération. L'inconvénient de cette méthode est que la surface d'essai doit avoir la même forme que la surface de référence si non il va y avoir la formation de beaucoup de franges [32].

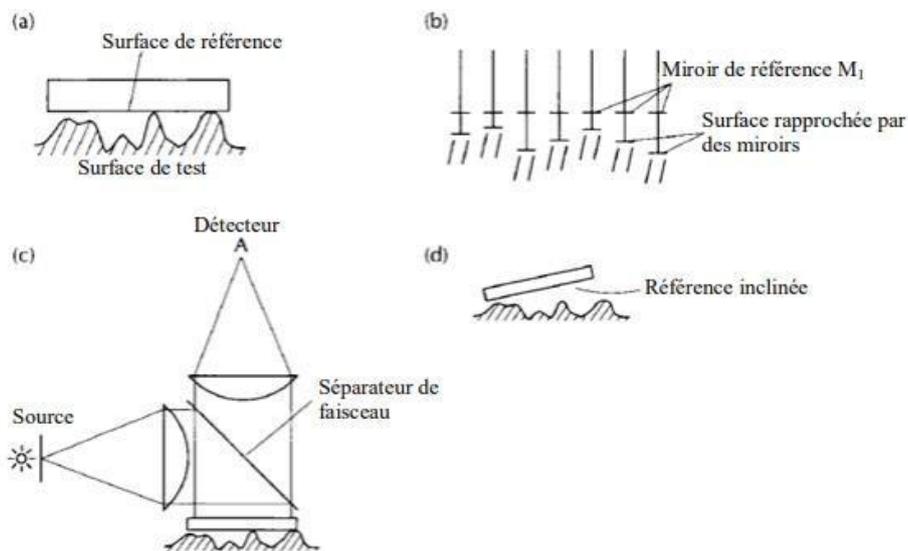


Figure II.18 : Méthodes de Tolansky

II.10 Comparaison entre la méthode optique et la méthode mécanique (palpage) :

Les méthodes optiques sont basées sur des lois optiques, ce qui peut être un avantage ou un inconvénient. Par exemple, si la résolution est fixée, l'angle opposé à la lentille ne peut pas être modifié, donc aucun de ces trois éléments : l'angle, la résolution et le point focal ne peut être modifié sans affecter les autres. La méthode de palpage permet d'orienter l'angle du palpeur et de modifier la taille de la pointe du palpeur sans affecter l'un à l'autre. Une comparaison simple des propriétés des deux méthodes de mesure (optique et mécanique) est présentée dans le tableau 2 Chaque avantage est représenté dans la colonne correspondante.

Table II.1 : Comparaison entre la méthode mécanique et la méthode optique

METHODE MECANIQUE	METHODE OPTIQUE
Endommagement possible	Pas d'endommagement
Mesure la géométrie	Mesure le chemin optique
La pointe peut se casser	La sonde ne peut pas être cassée
Insensible à l'inclinaison de la pièce	Ne permet qu'une inclinaison limitée.
Vitesse relativement lente	Le balayage peut être très rapide

II.11 Conclusion :

Ce chapitre traite de manière approfondie des concepts fondamentaux de la rugosité de surface, avec une présentation des diverses mesures de rugosité. Les différents mécanismes d'usure des outils qui se produisent lors d'une opération de coupe sont discutés. De plus, un état des lieux des connaissances sur les modes d'usure pour l'usinage.

III. Chapitre III : Partie Expérimentale

III.1 Expérience et équipement utilisés

Notre partie expérimentale consiste à l'usinage d'un arbre en acier de construction de nuance : **XC38** par un outil en carbure métallique.

La variable utilisé est la vitesse de coupe (v_c) et l'avance (f) étant constante.

Les paramètres de sorties sont les composantes des critères de rugosité de surface usinée.

Les expériences ont été réalisées dans l'atelier de mécanique au sein de l'entreprise « *Ferrovial* » et achevé au niveau de notre département.

L'objectif de ces essais est d'étudier l'influence de la vitesse de coupe sur la rugosité de la surface.

III.1.1 Routage d'usinage

Opération de Chariotage :

Selon le routage d'usinage, l'opération de chariotage avec les paramètres indiqués dans les tableaux ci-dessous, nous a permis d'étudier la variation de la rugosité de surface usinée en fonction de la vitesse de coupe (v_c) et de l'avance (f).

En à faire l'usinage deux fois sur la même pièce donc en à faire 4 essais.

Le premier usinage :

Condition d'usinage :

Essai 1 :

(Avec lubrification)

- $N = \text{variable}$
- $a = 1 \text{ mm/tr}$
- $f = 0.2 \text{ mm}$

Table III.1 : Condition d'essai 1

Palier	Vitesse N	Avance f	Nombre de passe	Profondeur de passe
1	250 tr/min	0.2	1	1mm
2	500 tr/min	0.2	1	1mm
3	750 tr/min	0.2	1	1mm
4	1000 tr/min	0.2	1	1mm
5	1500 tr/min	0.2	1	1mm

Condition d'usinage :

Essai 2 :

(A sec sans lubrification)

- V_c = variable
- a = 2mm
- f = 0.2 mm/tr

Table III.2 : Condition d'essai 2

Palier	Vitesse N	Avance f	Nombre de passe	Profondeur de passe
1	250 tr/min	0.2	1	1mm
2	500 tr/min	0.2	1	1mm
3	750 tr/min	0.2	1	1mm
4	1000 tr/min	0.2	1	1mm
5	1500 tr/min	0.2	1	1mm

Le deuxième usinage :

Condition d'usinage :

Essai 3 :

(Avec lubrification)

- N = variable
- a = 0.25 mm/tr
- f = 0.15 mm

Table III.3 : Condition d'essai 3

Palier	Vitesse N	Avance f	Nombre de passe	Profondeur de passe
1	2237	0.15	1	0.25
2	2323	0.15	1	0.25
3	2409	0.15	1	0.25
4	2495	0.15	1	0.25
5	2580	0.15	1	0.25

Condition d'usinage :

Essai 4 :

(A sec sans lubrification)

- N = variable
- a = 0.25mm
- f = 0.15 mm/tr

Table III.4 : Condition d'essai 4

Palier	Vitesse N	Avance f	Nombre de passe	Profondeur de passe
1	2237	0.15	1	0.25
2	2323	0.15	1	0.25
3	2409	0.15	1	0.25
4	2495	0.15	1	0.25
5	2580	0.15	1	0.25

III.1.2 Equipements utilisés :

Dans cette partie, nous allons commencer par expliquer les différentes étapes et opérations qui ont conduit à l'usinage de la pièce étudiée. Puis nous allons parler des différentes expériences que nous avons menées afin d'étudier l'influence des paramètres de coupe sur la durée de vie de l'outil et la qualité de surface de la pièce usinée. Nous allons également expliquer comment nous avons mesuré la rugosité de surface et l'appareillage utilisé pour l'étude de l'influence de paramètre de coupe (V_c) sur la surface obtenue.

III.1.2.1 Machine-outil utilisée :

Le tour utilisé est : Le tour au niveau de l'atelier de mécanique de l'entreprise « FERROVIAL » pour effectuer l'usinage et les essais est un tour (universel) CNC, modèle **CLX550**.

Tour universel CLX550 a caractéristiques techniques :

Nombres d'axes	3 axes
Diamètre de tournage maximal	480 mm
Longueur maximale de la pièce à usiner avec contre-poupée (usinable)	1 225 mm
Diamètre maximal du mandrin	400 mm
Vitesse max. de rotation des broches	3 250 tr/min
Rendement (100 % fdm)	22 kW (AC)

Diamètre max. intérieur tube de serrage

102 mm

Commande et logiciel

SIEMENS

Système de mesure directe dans l'axe A en standard



Figure III.1 : Vue générale



Figure III.2 : Commande numérique

III.1.2.2 Géométrie de l'outil :

L'outil de coupe utilisé, est un outil à charioter à plaquette, de forme losange de désignation **KCKM 11 « SANDVIK»** de la partie active en carbure métallique avec une géométrie matérialisé par :



Figure III.3 : Outil de chariotage finition



Figure III.4 : Outil de chariotage d'ébauche



Figure III.5 : Pastille d'outil en carbure « SECO »

III.2 Matériaux utilisés :**III.2.1 Analyse technique de la matière de l'arbre :**

L'acier utilisé pour la fabrication des axes d'essieux ferroviaires est le EA1N (XC38) .on présente par la suite un tableau décrivant les caractéristiques métallographiques (composition Chimique) de cet acier ainsi que la description des caractéristiques mécaniques.

III.2.2 Les désignations de la matière :

AFNOR	DIN	NF EN 10027-1
XC 38	Ck 35	C35 (1.1181)

III.2.3 Composition chimique :

La composition chimique typique de l'acier XC38 est donnée dans le tableau suivant :

Table III.5 : Composition chimique de l'acier XC38

Eléments	C	S	Mn	P	Si
%	0.32 – 0.39	≤ 0.035	0.50 – 0.80	≤ 0.035	0.40 maxi

III.2.4 Caractéristiques mécanique (moyennes état normalisé) :**Table III.6 :** Caractéristiques mécanique de la XC38

Caractéristiques Mécaniques	ER7
Module de Young E(MPa)	210 000
Coefficient de poisson	0.3
Limite élastique Rel (MPa)	300
Limite d'élasticité à 0.2% RP0.2(MPa)	320
Résistance maximale en traction Rm (MPa)	650
Allongement total après rupture A(%)	19

III.2.5 Propriétés :

Acier au carbone, à moyenne teneur, très souvent utilisé en mécanique générale de part sa bonne usinabilité et ses caractéristiques mécaniques.

Apte pour les traitements thermiques.

III.2.6 Domaine d'application :

Pièces non soumises aux chocs, mais nécessitant une bonne résistance : axes, boulonnerie, forge (levier, arbre ...)

Soudage

Soudabilité médiocre (précautions nécessaires, préchauffage et revenu de stabilisation recommandés).

Livraison

Etirés ronds ou tournés galetés tolérances H10

Ronds laminés à usinabilité améliorée

Ronds laminés conventionnels

Carrés laminés

Plat laminés

III.3 Régime de coupe :

Le régime de coupe a été choisi en fonction de la matière en œuvre ainsi que celle de l'outil de coupe utilisé à la réalisation de l'opération imposée. Les régimes de coupe utilisés dans cette dernière, sont indiqués dans les tableaux ci-après.

III.4 Présentation de l'éprouvette :

Notre pièce est un arbre de longueur $L=235\text{mm}$ et de diamètre $D=38\text{mm}$

L'éprouvettes de diamètre $D=38\text{mm}$, a été préparées en 10 paliers, les paliers ont été usiné avec le même outil mais avec une vitesse de coup différente.

L'usinage se déroule selon le routage suivant :

Nous avons fait l'usinage deux fois sur les paliers à sec en premier. Ensuite avec les même condition de coupe, mais sous lubrifiant.



Figure III.6 : L'éprouvette

Largeur du palier 19mm, Séparé par des gorges de profondeur 4mm et largeur de 3mm pour dégagement de l'outil.

Le montage on a utilisé un montage mixte.

Voir figure ci-dessous :

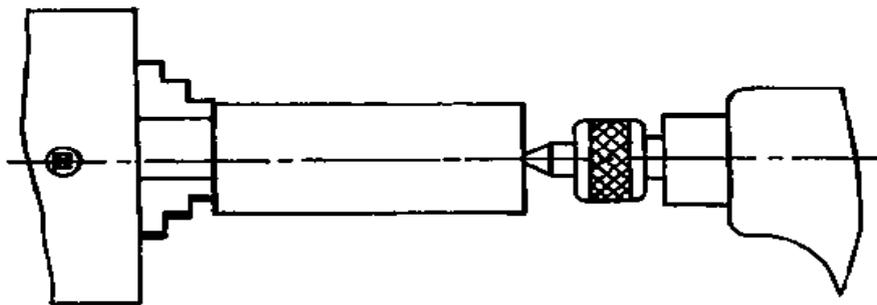


Figure III.7 : Dessin de montage de l'arbre



Figure III.8 : Montage de la pièce

III.5 Contrôle de l'état de surface :

Le contrôle de la surface usinée en utilisant deux instruments de mesure spécifique à la rugosité. Les deux appareils que nous avons utilisées sont présentées ci-dessous :

III.5.1 Rugosimètre :

Le rugosimètre est composé d'un stylet qui se déplace mécaniquement sur une surface pour enregistrer une image de la rugosité de surface sur la longueur déterminée.

Cette technique de mesure fournit un grand nombre de paramètres de mesure, et notamment :

1. R_{\max} : écart le plus grand entre le pic le plus élevé et le creux le plus bas sur la longueur analysée.
2. R_a : rugosité moyenne sur la longueur analysée.
3. R_t : écart entre le pic le plus haut et le creux le plus bas quelque soit la longueur analysée.
4. R_z : écart moyen entre le pic le plus haut et le creux le plus bas sur un certain nombre de longueur analysée
5. On utilise le plus souvent R_a .

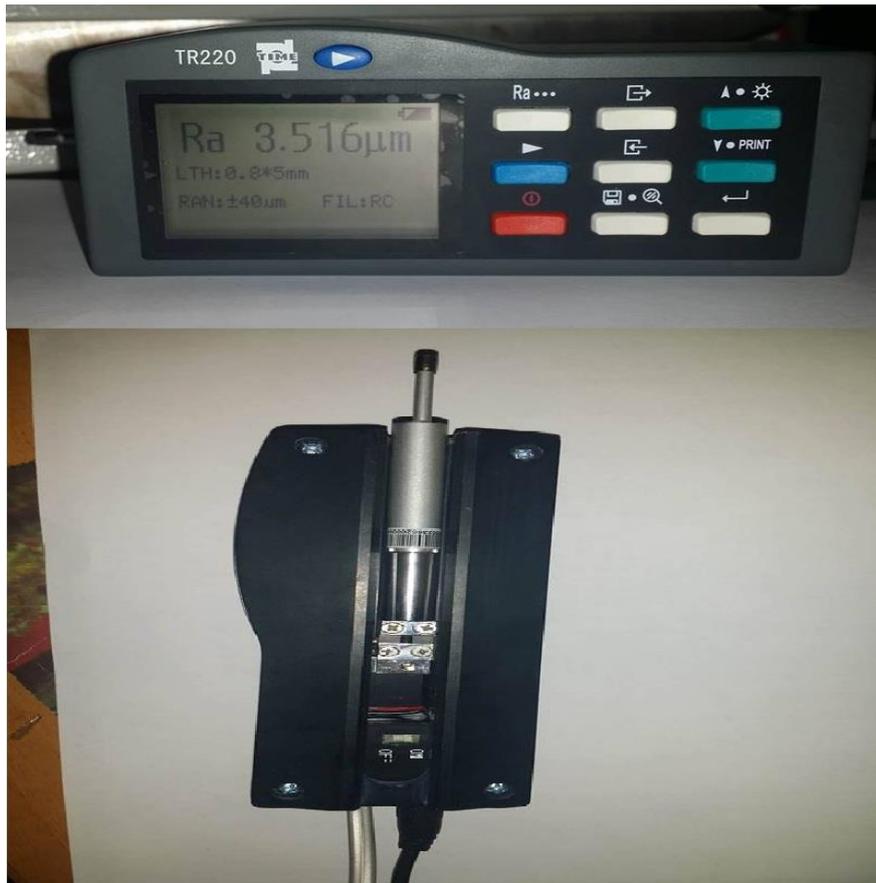


Figure III.9 : Rugosimètre TR220

III.5.2 Mesure tridimensionnelle :

Le cyber SCAN CT 100 est un appareil compact de haute résolution profilomètre sans contact. Les principaux composants du système sont un laser ou un capteur de lumière blanche et un système x-, y-motion sur une plate-forme en granit. Surtout les capteurs de lumière blanche chromatique combinent une haute précision et vitesse de mesure élevée. Les capteurs sont disponibles avec une résolution jusqu'à 3 nm et une plage de mesure jusqu'à 25mm.

Le système peut numériser une zone maximale de 150 mm x 150 millimètres. Le propriétaire et convivial cyber technologie software offre des analyses de métrologie de surface et automatisées routines de mesure.



Figure III.10 : Appareille de mesure tridimensionnelle

III.5.2.1 Exemple de quelques paliers qui nous avons mesurées avec cette appareille :

Pour le deuxième usinage :

Palier 1 lorsque l'usinage avec lubrification et à sec :

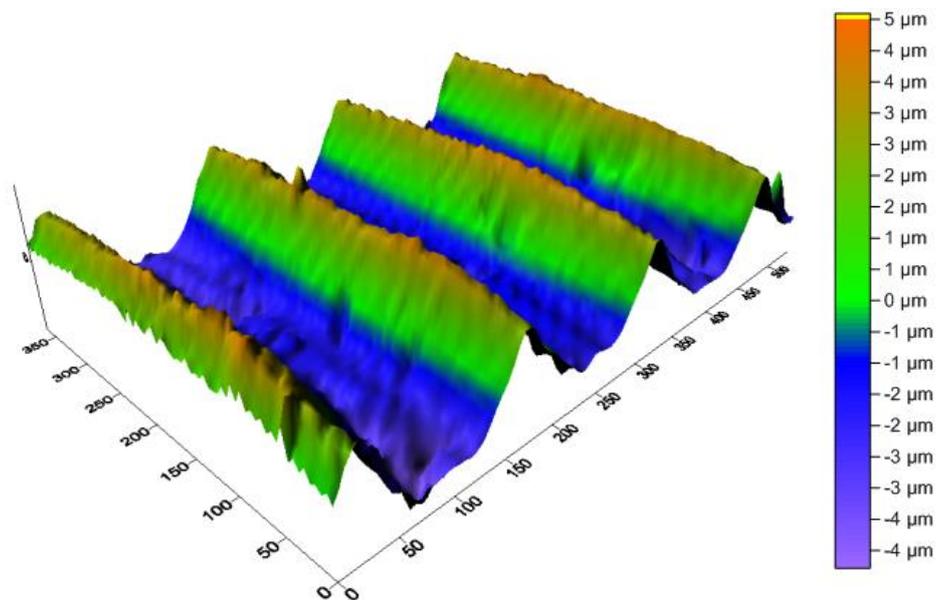


Figure III.11 : Profilographe 3D de l'usinage du palier 1 avec lubrification

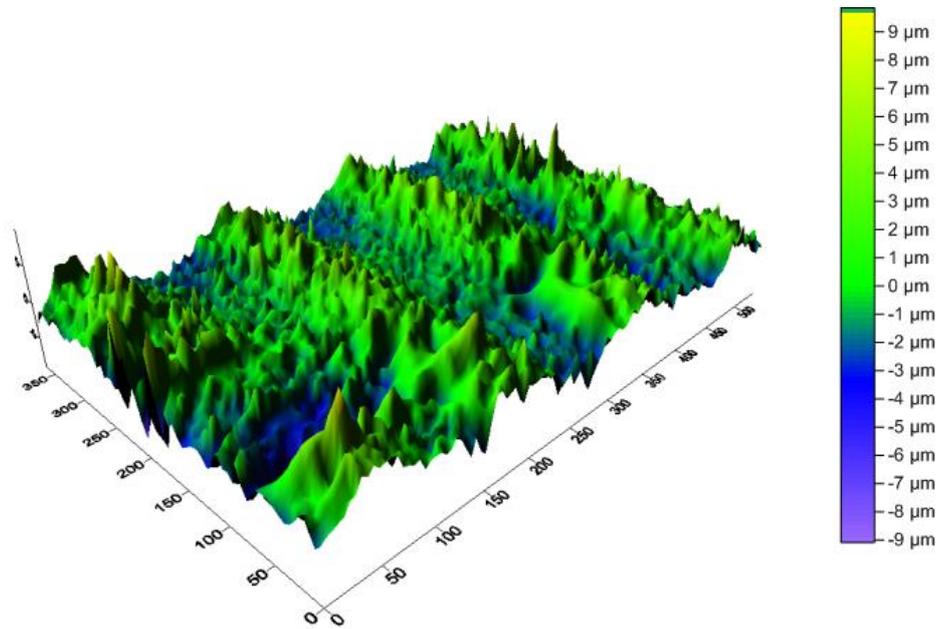


Figure III.12 : Profilographe 3D de l'usinage du palier 1 à sec

Palier 3 lorsque l'usinage avec lubrification et à sec :

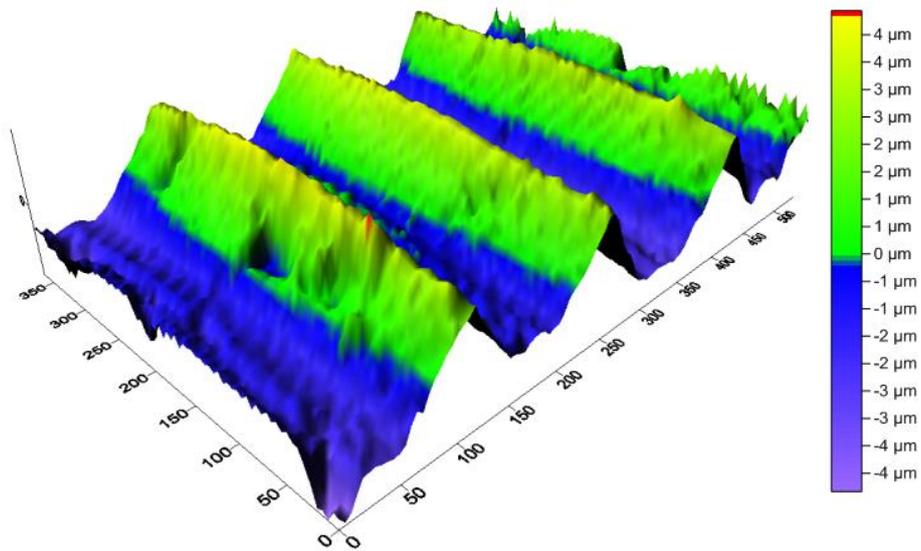


Figure III.13 : Profilographe 3D de l'usinage du palier 3 avec lubrification

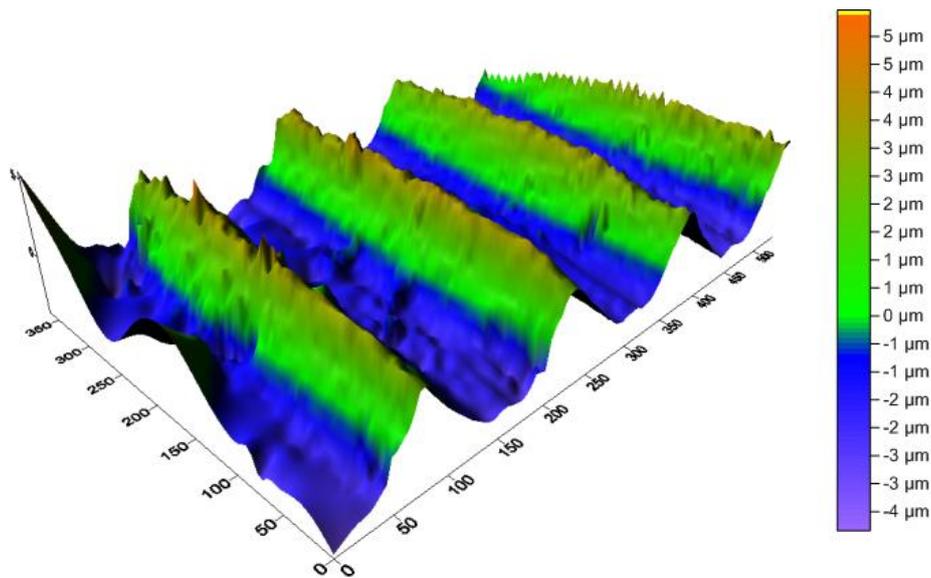


Figure III.14 : Profilographie 3D de l'usinage du palier 3 à sec

III.6 La vitesse de coupe V_c :

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} ; D = 37 \text{ mm}$$

V_c : vitesse de coupe en (m/min).

D : diamètre en point d'usinage (mm).

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

Pour l'usinage 1 :

- Pour $N = 250 \text{ tr}/min$:

$$V_c = \frac{3.14 \times 38 \times 250}{1000} = 29,05 \approx 29 \text{ m}/min$$

- Pour $N = 500 \text{ tr}/min$:

$$V_c = \frac{3.14 \times 38 \times 500}{1000} = 58,11 \approx 58 \text{ m}/min$$

- Pour $N = 750 \text{ tr//min}$:

$$V_c = \frac{3.14 \times 38 \times 750}{1000} = 87,17 \approx 87 \text{ m/min}$$

- Pour $N = 1000 \text{ tr//min}$:

$$V_c = \frac{3.14 \times 38 \times 1000}{1000} = 116,23 \approx 116 \text{ m/min}$$

- Pour $N = 1500 \text{ tr//min}$:

$$V_c = \frac{3.14 \times 38 \times 1500}{1000} = 174,35 \approx 174 \text{ m/min}$$

Pour l'usinage 2 :

- Pour $N = 2237 \text{ tr//min}$:

$$V_c = \frac{3.14 \times 38 \times 2237}{1000} = 260 \text{ m/min}$$

- Pour $N = 2323 \text{ tr//min}$:

$$V_c = \frac{3.14 \times 38 \times 2323}{1000} = 270 \text{ m/min}$$

- Pour $N = 2409 \text{ tr//min}$:

$$V_c = \frac{3.14 \times 38 \times 2409}{1000} = 280 \text{ m/min}$$

- Pour $N = 2495 \text{ tr//min}$:

$$V_c = \frac{3.14 \times 38 \times 2495}{1000} = 290 \text{ m/min}$$

- Pour $N = 2580 \text{ tr//min}$:

$$V_c = \frac{3.14 \times 38 \times 2580}{1000} = 300 \text{ m/min}$$

III.7 Résultat obtenues :**III.7.1 L'influence des paramètres de coupe en particulier la vitesse de coupe en usinage et son impact sur l'état de surface :**

A partir des valeurs relevées lors de les deux opérations de l'usinage des paliers (1, 2,...,10) établit dans les tableaux on trace les graphes en fonction de la vitesse de coupe (V_c) $R_a=f(V_c)$.

Les graphes qu'on a obtenus nous donnent une idée sur l'influence de la vitesse de coupe sur la qualité du produit fini ainsi un choix précis d'une vitesse de coupe assurant ainsi une meilleur état de surface.

Opération d'usinage 1 :**Essai 1 :**

Condition d'usinage :

Usinage avec lubrification.

- L'avance $f=0.2$ mm/tr.
- Vitesse de rotation variée
- Profondeur de passe $a = 1$ mm

Table III.7 : Tableau des valeurs de la rugosité (R_a) lors de l'usinage 1 avec lubrification

Palier	$N_{tr/min}$	f mm/tr	a mm	V_c m/min	Mesure	R_a μm	R_q μm
1	250	0,2	1	29,05	1	5,015	6,198
2	500	0,2	1	58,11	1	4,434	5,579
3	750	0,2	1	87,17	1	2,281	2,872
4	1000	0,2	1	116,23	1	2,520	3,092
5	1500	0,2	1	174,35	1	2,096	2,552

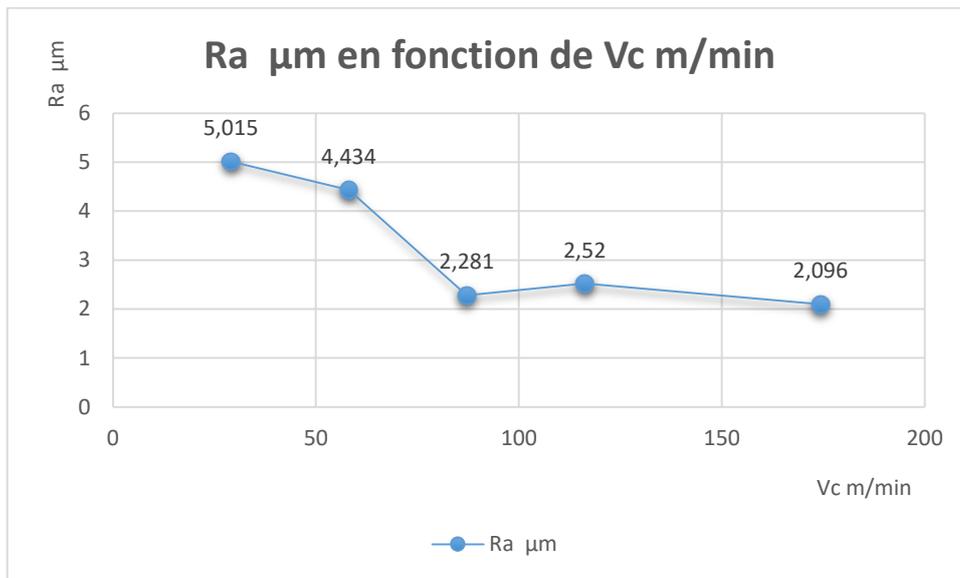


Figure III.15 : Evolution de la rugosité(Ra) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l’usinage avec lubrification, a et f constants

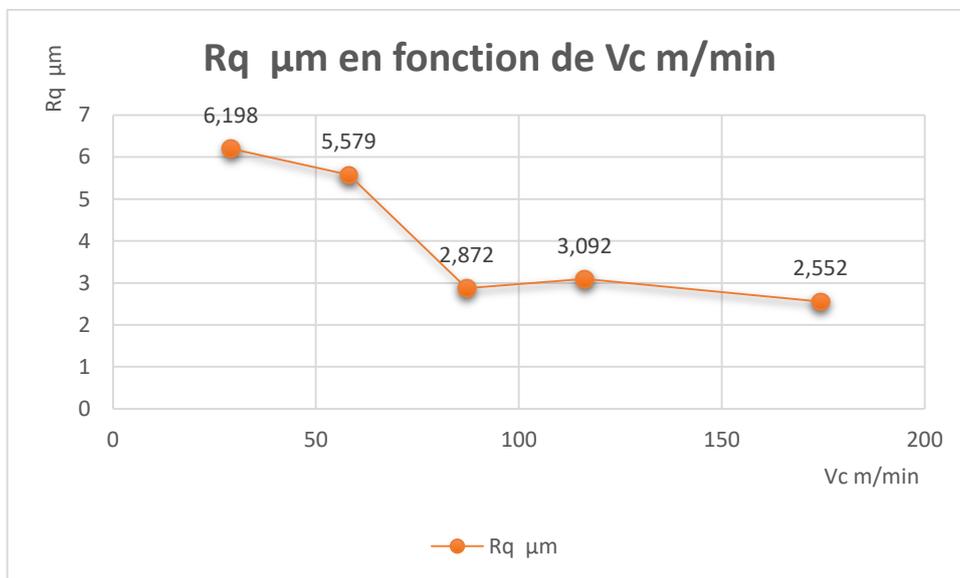


Figure III.16 : Evolution de la rugosité(Rq) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l’usinage avec lubrification, a et f constants

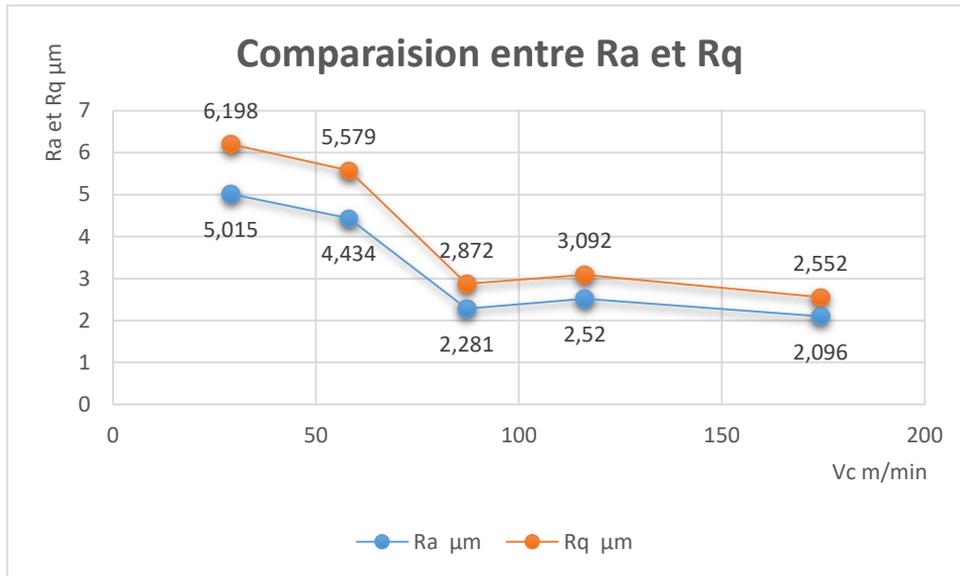


Figure III.17 : Comparaison entre l'évolution de la rugosité(Ra) et (Rq) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l'usinage avec lubrification, a et f constants

Essai 2 :

Usinage à sec.

Condition d'usinage :

- L'avance $f=0.2$ mm/tr.
- Vitesse de rotation variée
- Profondeur de passe $P = 1$ mm

Table III.8 : Tableau des valeurs de la rugosité (Ra) lors de l'usinage 1 à sec

Palier	N _{tr/min}	f mm/tr	a mm	Vc m/min	Mesure	Ra µm	Rq µm
1	250	0,2	1	29,05	1	3,256	4,146
2	500	0,2	1	58,11	1	4,562	5,751
3	750	0,2	1	87,17	1	3,775	4,595
4	1000	0,2	1	116,23	1	2,774	3,369
5	1500	0,2	1	174,35	1	4,229	5,142

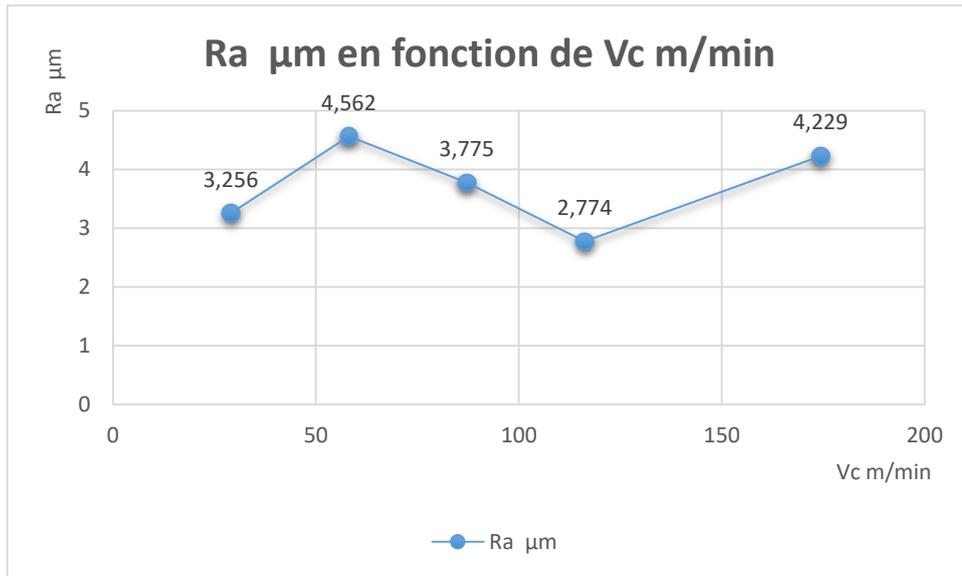


Figure III.18 : Evolution de la rugosité(Ra) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l’usinage à sec, a et f constants à sec

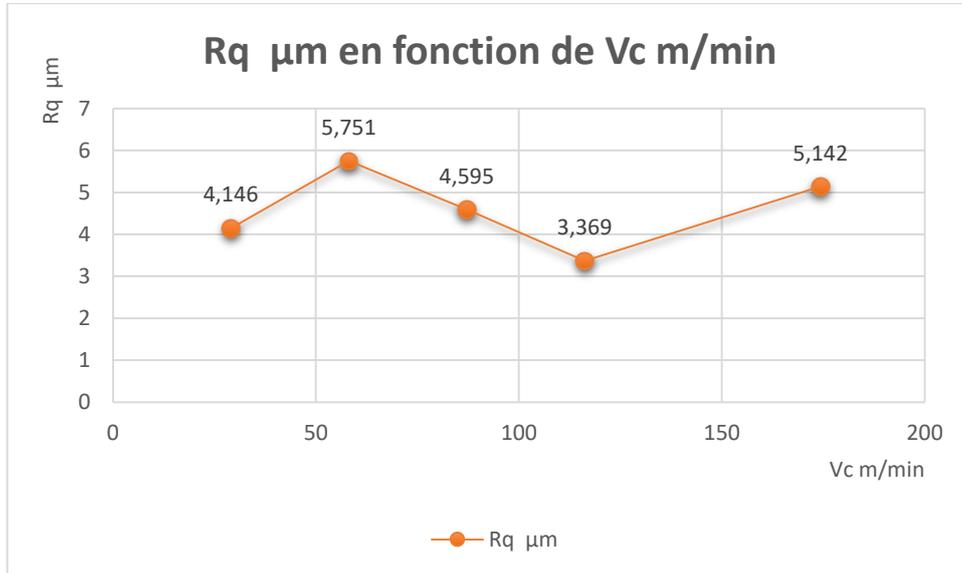


Figure III.19 : Evolution de la rugosité(Rq) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l’usinage à sec, a et f constants à sec.

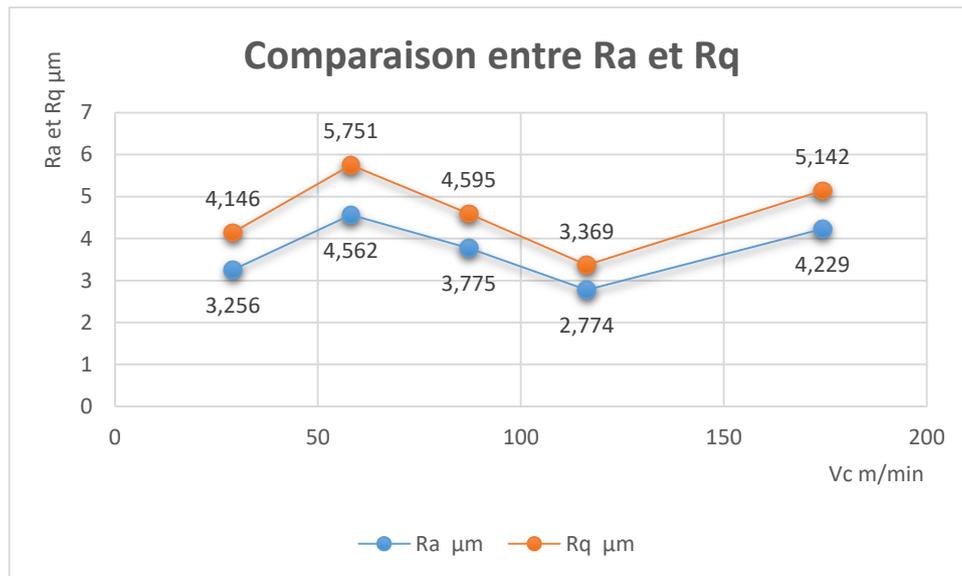


Figure III.20 : Comparaison entre l'évolution de la rugosité(Ra) et (Rq) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l'usinage à sec

Opération d'usinage 2 :

Essai 3 :

Condition d'usinage :

Usinage avec lubrification.

- L'avance $f=0.15$ mm/tr.
- Vitesse de rotation variée
- Profondeur de passe $a = 0.25$ mm

Table III.9 : Tableau des valeurs de la rugosité (Ra) lors de l'usinage 2 avec lubrification

Palier	N _{tr/min}	f mm/tr	a mm	Vc m/min	Mesure	Ra µm	Rq µm
1	2237	0.15	0.25	260	1	0,381	0,497
2	2323	0.15	0.25	270	1	0,411	0,523
3	2409	0.15	0.25	280	1	0,423	0,539
4	2495	0.15	0.25	290	1	0,528	0,699
5	2580	0.15	0.25	300	1	0,644	0,821

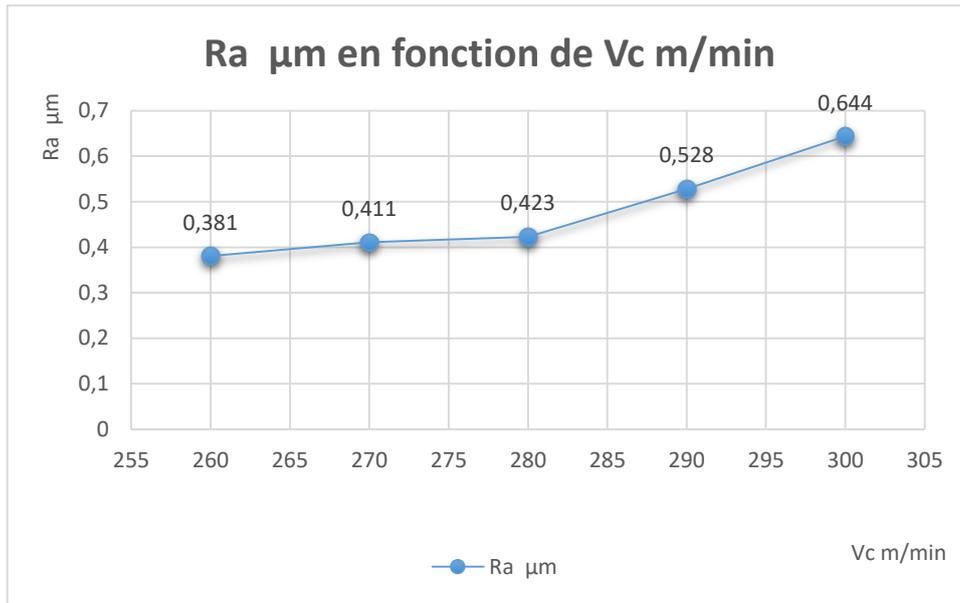


Figure III.21 : Evolution de la rugosité(Ra) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l’usinage avec lubrification, a et f constants

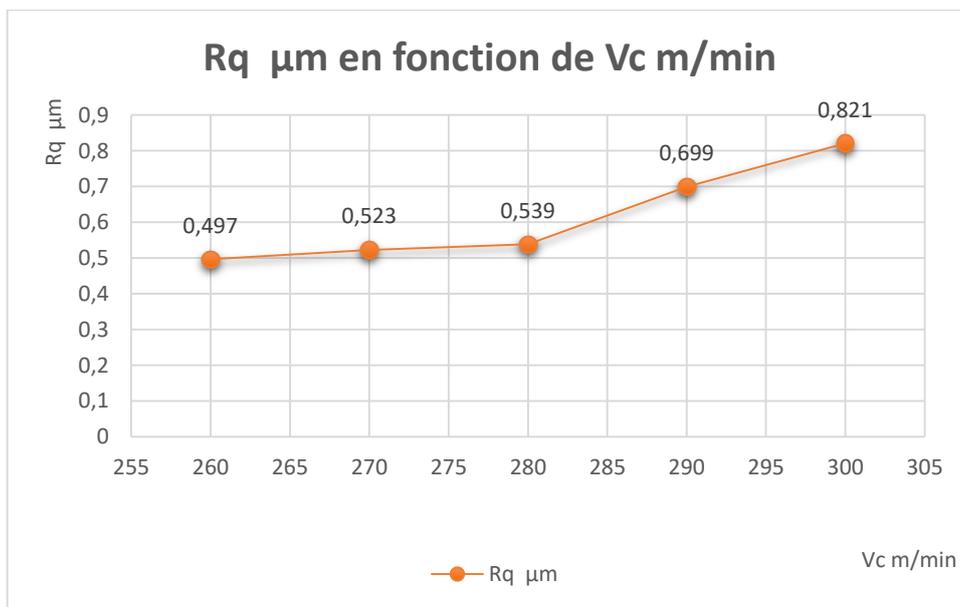


Figure III.22 : Evolution de la rugosité(Rq) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l’usinage avec lubrification, a et f constants

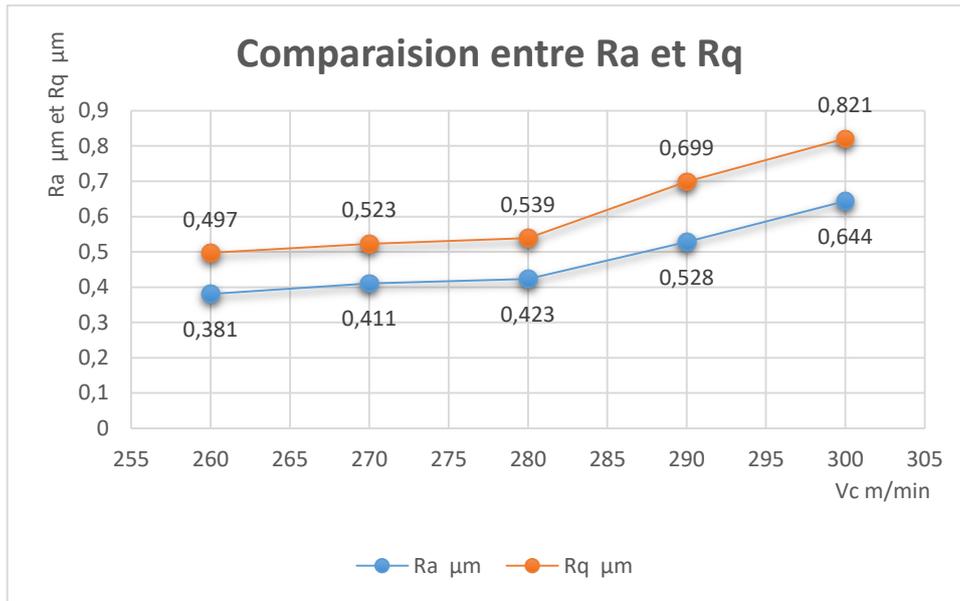


Figure III.23 : Comparaison entre l'évolution de la rugosité(Ra) et (Rq) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l'usinage avec lubrification, a et f constants

Essai 4 :

Condition d'usinage :

Usinage à sec.

- L'avance $f=0.15$ mm/tr.
- Vitesse de rotation variée
- Profondeur de passe $a = 0.25$ mm

Table III.10 : Tableau des valeurs de la rugosité (Ra) lors de l'usinage 2 à sec

Palier	N _{tr} /min	f mm/tr	a mm	Vc m/min	Mesure	Ra µm	Rq µm
1	2237	0.15	0.25	260	1	0,793	1,043
2	2323	0.15	0.25	270	1	0,567	0,722
3	2409	0.15	0.25	280	1	0,416	0,499
4	2495	0.15	0.25	290	1	0,489	0,543
5	2580	0.15	0.25	300	1	0,456	0,511

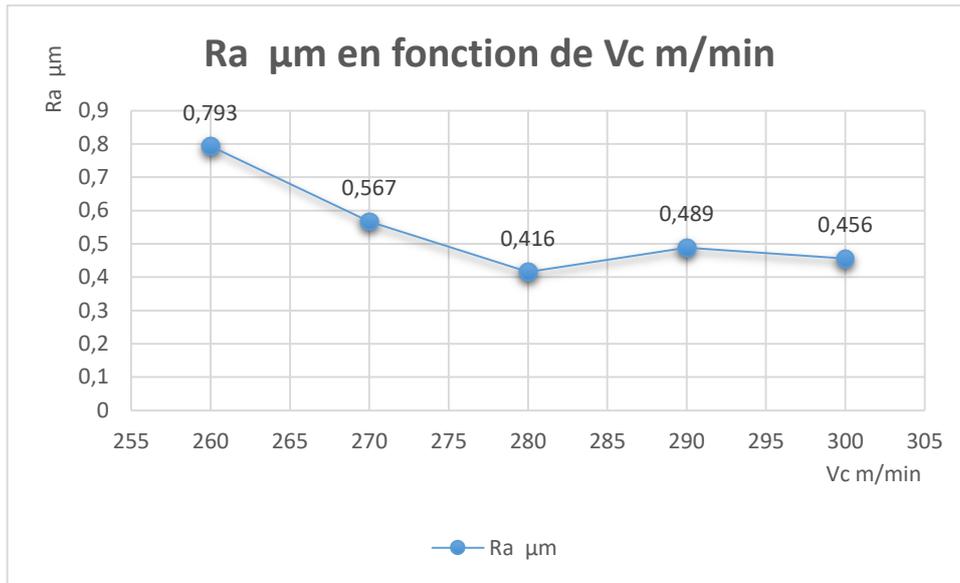


Figure III.24 : Evolution de la rugosité(Ra) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l’usinage à sec, a et f constants à sec

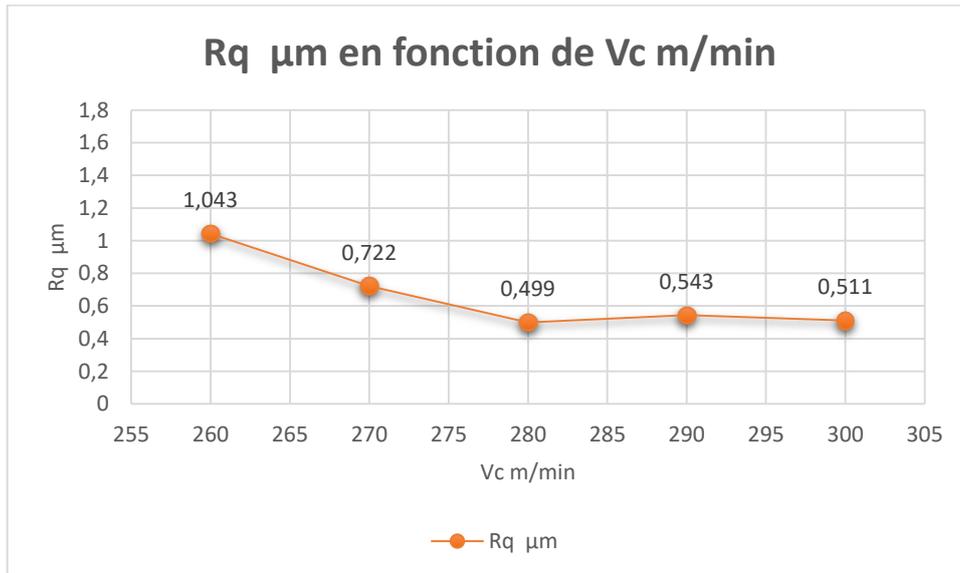


Figure III.25 : Evolution de la rugosité(Rq) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l’usinage à sec, a et f constants à sec.

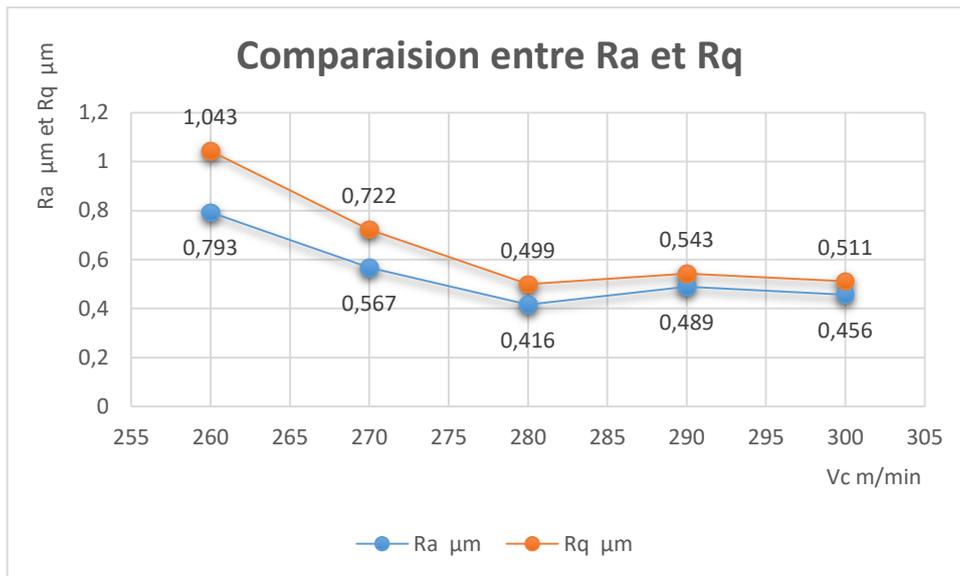


Figure III.26 : Comparaison entre l'évolution de la rugosité(Ra) et (Rq) en fonction de la vitesse de coupe(Vc) lors de l'usinage à sec

III.7.2.Comparaison entre les résultats obtenues de Ra et Rq avec et sans lubrification pour les 4 essais :

Le premier usinage :

Pour l'essai 1 et 2

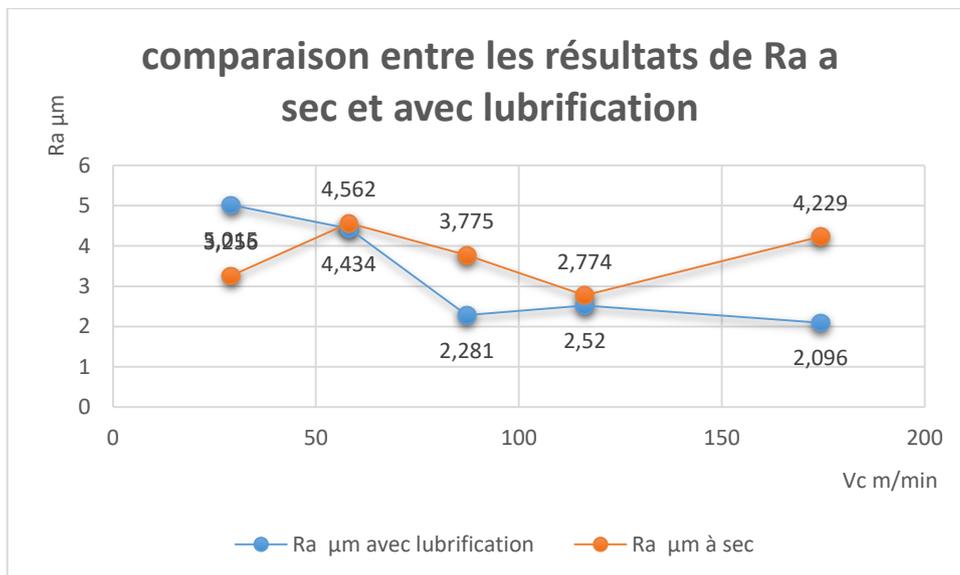


Figure III.27 : Comparaison entre les résultats obtenues de Ra avec et sans lubrification pour l'essai 1 et 2

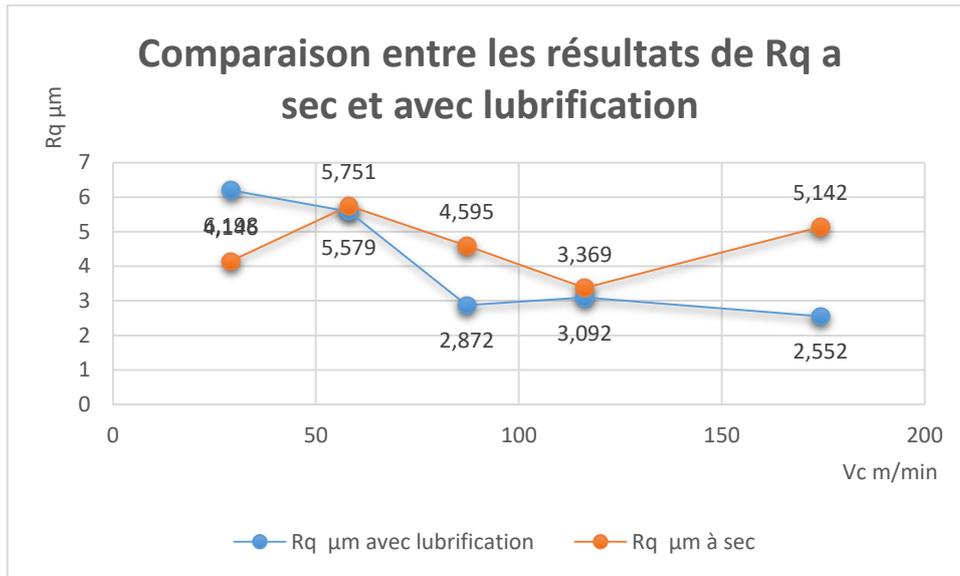


Figure III.28 : Comparaison entre les résultats obtenues de Rq avec et sans lubrification pour l’essai 1 et 2

Le deuxième usinage :

Pour l’essai 3 et 4 :

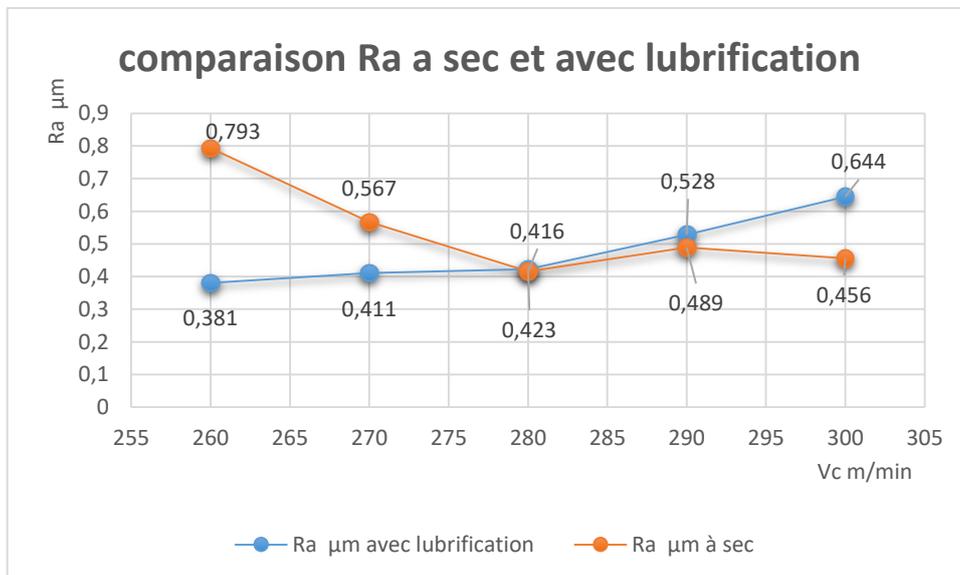


Figure III.29 : Comparaison entre les résultats obtenues de Ra avec et sans lubrification pour l’essai 3 et 4

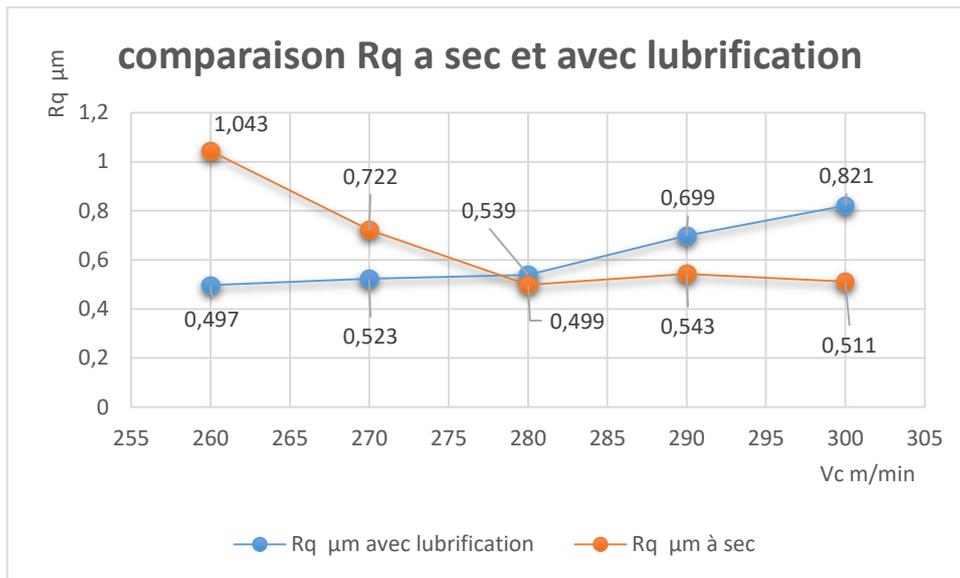


Figure III.30 : Comparaison entre les résultats obtenues de Rq avec et sans lubrification pour l'essai 3 et 4

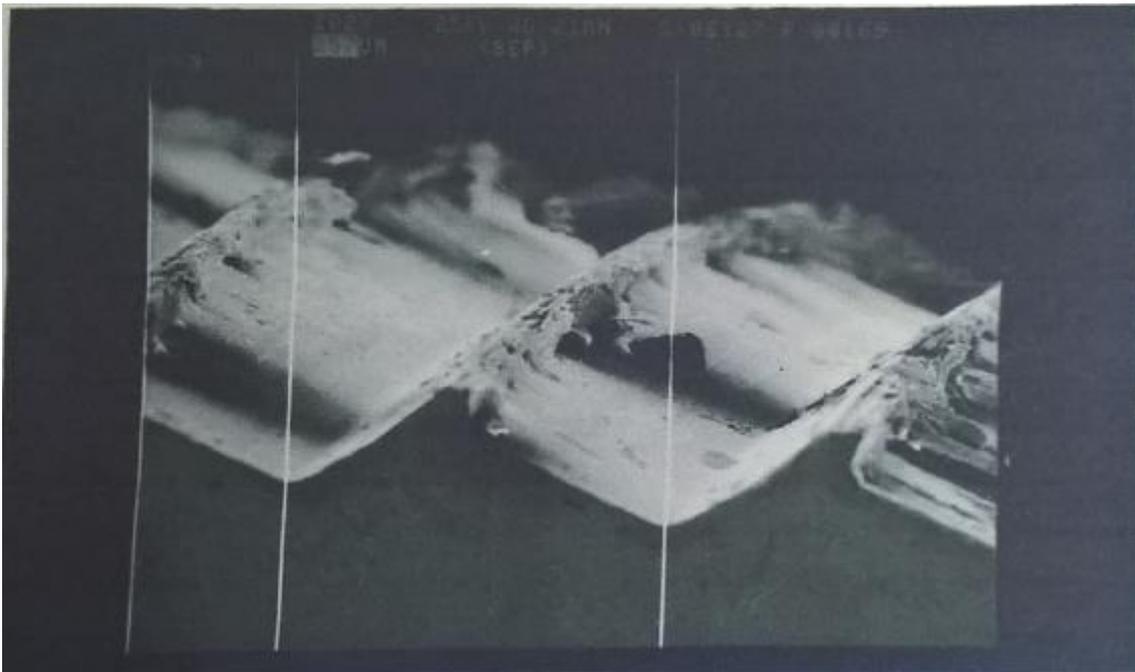


Figure III.31 : Exemple de surface fini avec un profil de l'outil.

III.8 Discussion :

Notre étude sur la rugosité de surface lors de l'usinage de l'acier **XC38** en prenant comme régime de coupe une vitesse variable avec une avance constante. Nous a conduit à déduire que la vitesse de coupe et un paramètre très influant au même titre que la lubrification.

Les paramètres de rugosités (R_a) obtenus sont regroupés dans les tableaux (7, 8,9et10) les graphes de variation de la rugosité et la comparaison entre les résultats obtenues sont tracés (voir graphe **Fig.15, 16,.... ,30**).

On peut citer un paramètre plus important la lubrification qui joue un rôle aussi influant que les paramètres de coupes sur la rugosité. Un usinage sous lubrification améliore automatiquement l'état de surface selon les conditions de coupes imposées.

R_a = sans lubrification.

R_{a1} = avec lubrification.

Cela confirme que l'usinage réalisé avec lubrification a donné des résultats meilleurs que sans lubrification ceci dit que l'état de surface est meilleur.

- Influence des paramètres de coupes sur la durée de vie de l'outil :

Un paramètre plus important la lubrification qui joue un rôle aussi influant que les paramètres de coupes et la géométrie de l'outil sur la pièce. Un usinage sous lubrification donne automatiquement une durée de vie plus longue à l'outil selon les conditions de coupes imposées.

Pour l'usinage avec lubrification, les valeurs de la rugosité obtenues sont inférieures par rapport aux celles obtenues à sec pour tous les paliers usinés.

III.9 Conclusion et perspectives

La rugosité de surface et la longévité de l'outil dépendent directement des paramètres de coupe, vitesse, avance et profondeur de passe. Dans la partie expérimentale, on a utilisé la profondeur de passe et l'avance constante tout le long de l'usinage et la vitesse de coupe variable.

La vitesse de coupe est un paramètre très influant sur la rugosité de surface ainsi que sur la durée de vie de l'outil comme on peut le constater d'après les résultats obtenus. La vitesse de coupe augmente, la rugosité diminue, l'état de surface est meilleur et l'usure diminue ce qui implique une augmentation de la durée de vie de l'outil.

La lubrification est un facteur très important pour améliorer l'état de surface de la pièce usinée ainsi pour augmenter la durée de vie de l'outil on peut s'en passer de cette dernière si on utilise l'usinage à grande vitesse.

On remarque au Chapitre **III** que les résultats obtenus avec lubrification sont beaucoup meilleur que ceux obtenus à sec. Avec les mêmes conditions de coupe

CONCLUSION GENERALE :

Ce mémoire est une initiation à étudier une opération du procédé de tournage sur une pièce d'acier XC38 et l'étude de l'influence de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface lors de cette opération.

Le premier chapitre de notre recherche bibliographique a montré qu'il est nécessaire de connaître l'évolution du procédé d'usinage ainsi que toutes les étapes importantes lors du processus de fabrication. Les différents procédés d'usinage ont été cités du fait que notre travail s'est concentré sur une opération du procédé de tournage.

La deuxième partie de notre recherche bibliographique a montré l'importance de la coupe des métaux qui parfois est difficilement réalisable car d'une part, elle est sujette aux conditions de coupe et d'autre part, les paramètres de coupe utilisés lors de l'usinage influent d'une manière importante sur l'état de surface. Cependant, l'utilisation adéquate des paramètres de coupe (la vitesse de coupe) peut améliorer cet état de surface. Un mauvais choix de paramètre de coupe conduit l'obtention d'un mauvais état de surface.

L'objectif principal de ce travail de recherche consiste à étudier l'effet de l'état de surface d'un acier XC38.

On peut conclure que la rugosité dépend directement de régime de coupe et en particulier la vitesse de coupe.

Nous bénéficions de cette expérience que nous pouvons produire des pièces de haute qualité et longue durée de vie. En plus de produire le plus de pièces en moins de temps et avec un minimum d'effort, grâce au réglage contrôlable des paramètres de coupe surtout la vitesse de coupe et à leur ajustement à l'échelle parfaite.

Référence bibliographique

- [1] **BEDRIN C.**, Généralités sur la coupe des métaux, Lyon, Conférences CAST,INSA de Lyon, 1971, pp.5-71.
- [2] Cours de « Fabrication mécanique », 3^{eme} année ingénieur, Génie Mécanique.
- [3] **RAYNALD LAHEURTE**, « Application de la théorie de seconde gradient a lacoupe des matériaux », thèse de doctorat, Université Bordeaux I, France, 2004.
- [4] Germain, Guenaël. Contribution à l'optimisation du procédé d'usinage assisté laser. Diss. Arts et Métiers ParisTech, 2006.
- [5] AVEVOR, Yao et MOUFKI, Abdelhadi. Influence de la vitesse de coupe sur les conditions thermomécaniques à l'interface outil-copeau. S09d Procédés d'usinage, 2015.
- [6] Davies ,matthew A , pratt,jon R,Dutterer,Brian S et al the stability of low radial immersion milling .CIRP annais-Manufacturing Technology , 2002 ,vol 55,no 5,p,503-518,
- [7] J. L. Fanchon, Guide des sciences et technologie industrielle, Edition Nathan Paris, France, 1994.
- [8] Groupe Kislser France, Mesure des efforts de coupe, www.kisler.com.
- [9] L. Pimbaud, G. Laves, J. Moulin, Guide pratique de l'usinage, tome 1, Edition Hachette,France, 2003.
- [10] E .J.Armarego, S.Verezub, P.Samaranayake, The effects of coatings on the cutting process, friction, forces and predictive cutting models in machining operations, Journal of Engineering Manufacture, n° 216, pp. 347-356, 2002.
- [11] N.S. Atcherkane, Les machines travaillant par enlèvement de métal, Société des publications mécaniques Paris, France.
- [12] J. Boulanger,Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface,Article B7010, Technique de l'Ingénieur, 1991.
- [13] J.M. Linares, J.M. Sprauel C. Marty, Analyse du processus élémentaire de mesure, Revue Contrôle industriel, n°205, p27-31, 1997.
- [14] Kane Malal, contribution à l'étude de l'influence de la rugosité et des effets non newtoniens dans les contacts sévères lubrifiés, institut national des sciences appliquées de Lyon 2003.
- [15] P.Yves Manach, S.Thuillier, H.Laurent, N.Le Maoût, R.Grèze ; Mise en forme des matériaux métalliques par déformation plastique : influence du comportement matériel, Laboratoire d'ingénierie des Matériaux de Bretagne LIMATB Université de Bretagne Sud,

14^{ème} Colloque National de la recherche en IUT Lyon 2008.

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

[17] Jacques Boulanger. Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface, sous la direction Eric Felder, BM 74 technique de l'ingénieur. Janvier 2000.

[18] Cheung C.F, W.B. Lee. A theoretical and experimental investigation of surface roughness formation in ultra-precision diamond turning. International Journal of Machine Tools & Manufacture (40) 979–1002. 2000.

[19] Bedrin. C, Roumesy. B. Usinage par outil coupant, Fascicule 1-2, INSA-Lyon, 1989.

[20] Conception et dessin (memotech) 7^e édition rue MICHAEL FARADAY, 78184 Saint-Quentin en Yvelines Les pages : 130.131.132.133.134.135.136.

[21] CETIM, Les états de surface -Description-Elaboration-Mesure, Note technique N°18, 1979.

[22] http://www.sandvik.coromant.com/fr/fr/knowledge/materials/measuring_surfaces/pages/de_fault.aspx .

[23] Enache S. La qualité des surfaces usinées, Dunod, Paris 1972.

[24] Dawson. T. G. Machining hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride cutting tools, Gorgia institute of technology. 2002.

[25] Poulachon. G, Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis, Thèse de doctorat de l'ENSAM de Cluny, 1999.

[26] Philippe Depeyre. Fabrication mécanique, Faculté des sciences et technologies, Université de la Réunion, pp 1-17. 2005.

[27] [https://public.iutenligne.net/mecanique/mecanique-des-fluides/courtin/Mecanique_des_fluides_formulaire/co/module Mecanique%20des%20fluides%20formulaire_5.html](https://public.iutenligne.net/mecanique/mecanique-des-fluides/courtin/Mecanique_des_fluides_formulaire/co/module_Mecanique%20des%20fluides%20formulaire_5.html).

[28] David J Whitehouse. Handbook of Surface and Nanometrology. Institute of Physics Publishing, 2003.

[29] J. Barton, C. Guillemet. Le verre : science et technologie. EDP Sciences, 2005.

[30] Hicks T R and Atherton P D. The micropositioning book. London: Penton Press, 2000.

[31] Ashby M F. «On materials and shapes.» Acta Metall 39 (1991): 1025-39.

[32] Tsukada T and Sasajima K. «3D measuring technique for surface asperities.» Wear 71 (1981): 1-14.

[33] Brodeman R. «Roughness Form and Waviness Measurement by Means of Light Scattering.» Prec. Eng 8 (1986): 221-226