



UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA

جامعة باجي مختار - عنابة

BADJI MOKHTAR - ANNABA UNIVERSITY

Faculté : Science de l'ingénierie

Département : Génie mécanique

Domaine : Sciences et techniques

Spécialité : Fabrication mécanique et productique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

**Influence de la vitesse d'avance sur la rugosité de surface
lors de l'usinage de l'acier E 24**

Présenté par :

ADJABI Baha - Eddine

Encadrant :

Dr. NEHAL Abdelaziz

Université Badji Mokhtar - ANNABA

Jury de soutenance :

MOKAS Nacer	MCA	Université Badji Mokhtar - ANNABA	Président
BENCHIHEUB Slimane	MCA	Université Badji Mokhtar - ANNABA	Examineur
NEHAL Abdelaziz	MCA	Université Badji Mokhtar - ANNABA	Encadreur

Année universitaire 2021 - 2022

DEDICACES

Tout d'abord je remercie Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité, la volonté et de la patience pour réaliser ce travail.

Ce mémoire est dédié

A mes chers parents : Samira et Djamel qui m'ont toujours poussé et motivé dans mes études, je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère votre bénédiction m'accompagne toujours.

A ma chère et tendre sœur Wessal

A toute ma famille maternelle et paternelle

Je dédie ce simple travail spécialement à Aya qui m'a soutenu, apporté beaucoup de bonheur dans ma vie

A toute la promotion fabrication mécanique et productique 2022

REMERCIEMENTS

Je remercie le bon Dieu de nous avoir offert la vie, la foi et la force pour aller de l'avant et être la fierté de nos proches et de m'avoir permis d'en arriver là.

Je tiens à exprimer mon remerciement respectueux, et profonde reconnaissance à mon encadreur Dr. NEHAL Abdelaziz pour avoir bien voulu diriger avec bienveillance ce travail

Mes meilleurs remerciements à tous mes enseignants de la licence jusqu'au master qui ont contribué à ma formation durant nos années d'études.

Je remercie également les membres de jury qui feront L'honneur de juger mon travail.

SOMMAIRE

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

CHAPITRE I : GENERALITE SUR L'USINAGE

I.1	Introduction	2
I.2	Tournage mécanique.....	2
I.3	Principe de tournage	3
I.4	Machine outil pour tournage.....	4
I.5	Différents types de tours	6
I.5.1	Les tours parallèles à charioter et à fileter	6
I.5.2	Les tours à copier	6
I.5.3	Les tours semi-automatiques.....	7
I.5.4	Les tours automatiques	8
I.5.5	Tour conventionnel	9
I.5.6	Tour automatique (mono broche ou multibroche)	9
I.5.7	Tours à commande numérique.....	9
I.5.8	Tours verticaux	10
I.6	Différentes opérations de tournage.....	11
I.6.1	Les opérations de tournage extérieur	11
I.6.1.1	Le tournage	11
I.6.1.2	Chariotage.....	11
I.6.1.3	Le tronçonnage	12
I.6.1.4	Le dressage (externe et interne).....	12
I.6.1.5	Le rainurage (externe et interne).....	13
I.6.1.6	Le filetage (externe et interne).....	13
I.6.1.7	Chanfreinage (externe et interne)	14
I.6.2	Les opérations de tournage intérieur.....	14
I.6.2.1	Le perçage.....	14

I.6.2.2	L'alésage.....	15
I.6.2.3	Le taraudage.....	15
I.7	Outil.....	16
I.7.1	Faces et arêtes de l'outil.....	16
I.7.2	Angles de l'outil.....	17
I.7.3	Outil de coupe à plaquette rapportée.....	19
I.7.4	Matériaux de l'outil	20
I.7.5	Durée de vie d'un outil de coupe	21
I.7.5.1	Type d'usure	21
I.8	Condition de coupe	25
I.8.1	Vitesse de coupe	25
I.8.2	Avance	26
I.8.2.1	Les types d'avances	26
I.8.3	Profondeur de passe	27
I.9	Paramètres géométriques de coupe.....	28
I.10	Conclusion	29

CHAPITRE II : RUGOSITE D'USINAGE

II.1	Introduction	30
II.2	Rugosité.....	30
II.3	Les défauts d'états de surface.....	30
II.3.1	Ordre 1 : écart de forme ou de position (ligne moyenne)	31
II.3.2	Ordre 2 : ondulations périodiques	32
II.3.3	Ordre 3 : stries ou sillons.....	33
II.3.4	Ordre 4 : arrachement de matière.....	34
II.4	Différents types de lignes	35
II.4.1	Ligne moyenne	35
II.4.2	Longueur de base, d'évaluation.....	35
II.4.3	Lignes de référence	35
II.4.4	La ligne des moindres carrés.....	36

II.4.5	La ligne moyenne arithmétique.....	36
II.4.6	La ligne enveloppe supérieure.....	36
II.4.7	La ligne enveloppe inférieure.....	36
II.5	Paramètres de rugosité unidimensionnelle	36
II.5.1	Paramètres d'amplitude de rugosité.....	37
II.5.1.1	Rugosité moyenne Ra.....	37
II.5.1.2	Rugosité moyenne quadratique Rq.....	37
II.5.1.3	Hauteur maximale du profil Rt.....	37
II.5.1.4	Profondeur minimale des vallées Rv, Rm	38
II.5.1.5	Hauteur maximale des pics Rp.....	38
II.5.1.6	Amplitude moyenne Rtm.....	38
II.5.1.7	Profondeur moyenne des vallées Rvm	39
II.5.1.8	Hauteur moyenne des pics Rpm	39
II.5.1.9	Profondeur de rugosité de base R3z	39
II.5.1.10	Profondeur de rugosité moyenne R3zISO	40
II.5.1.11	Hauteur maximale moyenne Rz.....	40
II.5.1.12	Amplitude crête-à-crête moyenne RzISO.....	40
II.5.1.13	Asymétrie Rsk.....	41
II.5.2	Principaux paramètres de la rugosité.....	41
II.5.3	Paramètres liés aux motifs et à la ligne enveloppe.....	41
II.5.4	Paramètres liés à la ligne moyenne	43
II.5.4.1	Au niveau de la longueur de base.....	43
II.5.4.2	Au niveau de la longueur d'évaluation.....	44
II.5.5	Paramètres liés à la distribution d'amplitude	44
II.5.5.1	Distribution d'amplitude.....	44
II.6	Mesure de la rugosité.....	46
II.7	Techniques d'amélioration des états de surface	47
II.7.1	La rectification	47
II.7.1.1	Principe de la rectification.....	48
II.7.1.2	Avantage de la rectification.....	48
II.7.2	Superfinition.....	49
II.7.3	Polissage.....	50

II.7.4	Rodage.....	50
II.7.5	Galetage.....	50
II.7.5.1	Avantages du galetage	51
II.7.5.2	Galetage de renforcement.....	51
II.7.5.3	Galetage de mise en forme	52
II.7.5.4	Galetage de super finition.....	52
II.8	Lubrification	52
II.8.1	Les rôles de la lubrification.....	52
II.8.2	Les lubrifiantes.....	53
II.9	Liquide de coupe	53
II.9.1	Fonction assurées par les fluides d'usinage	54
II.9.2	Composition des fluides d'usinage	55
II.9.2.1	Huiles entières	55
II.9.2.2	Fluides de type émulsion	55
II.9.2.3	Fluides de type microémulsion.....	56
II.9.2.4	Fluides synthétiques	56
II.9.3	Risques liés aux fluides d'usinage	56
II.10	Indication de rugosité	57
II.11	Conclusion.....	58

CHAPITRE III : DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

III.1	Introduction	59
III.2	Partie expérimentale	59
III.2.1	Matière d'ébauche	59
III.2.1.1	Désignation de l'acier E24.....	59
III.2.1.2	Composition chimique	59
III.2.1.3	Caractéristique mécanique	59
III.2.1.4	Propriétés	59
III.2.1.5	Domaines d'application	60

III.2.2	Machine.....	60
III.2.2.1	Caractéristiques techniques.....	60
III.2.3	Choix de l'outil.....	61
III.2.4	Préparation des paliers.....	61
III.2.5	Instrument de mesure	63
III.2.5.1	Caractéristiques.....	64
III.2.5.2	Application.....	64
III.3	Discussion et interprétation des résultats.....	65
III.3.1	Résultats obtenus.....	65
III.3.1.1	Rugosité de surface déterminée lors d'un usinage à sec.....	65
III.3.1.2	Rugosité de surface déterminée lors d'un usinage avec lubrification.....	65
III.3.2	Interprétation des résultats.....	66
III.3.2.1	Influence de l'avance sur la rugosité de surface lors d'un usinage à sec....	66
III.3.2.2	Influence de l'avance sur la rugosité de surface lors d'un usinage avec lubrification	68
III.3.2.3	Valeur de la rugosité de surface.....	69
III.3.2.4	Influence de l'avance sur la rugosité de surface	69
III.4	Rugosité vue en 3 D.....	70
III.4.1	Aperçu	70
III.4.2	Applications	71
III.5	Conclusion.....	87
	CONCLUSION GENERALE	88
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	89

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE III : DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Tableau III.1 : Désignation de l'acier E24	59
Tableau III. 2 : Composition chimique	59
Tableau III. 3 : Caractéristique mécanique	59
Tableau III.4 : Valeurs de rugosité relevée lors d'un usinage à sec	65
Tableau III.5 : Valeurs de la rugosité obtenue lors d'un usinage avec lubrification.....	65
Tableau III.6 : Valeurs de rugosité relevées.....	69

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : GENERALITE SUR L'USINAGE

Figure I.1 : Tournage mécanique	3
Figure I.2 : Principe de tournage	4
Figure I.3 : Composante d'un tour (machine - outil)	5
Figure I.4 : Tour parallèle à charioter et à fileter	6
Figure I.5 : Tour a copié.....	7
Figure I.6 : Tour semi-automatique.....	7
Figure I.7 : Tour automatique universel.....	8
Figure I.8 : Tour automatique CNC	8
Figure I.9 : Tour conventionnel.....	9
Figure I. 10 : Tour parallèle à charioter et à fileter à commande numérique	10
Figure I.11 : Tour vertical	10
Figure I.12 : Tournage.....	11
Figure I.13 : Le chariotage	12
Figure I.14 : Le tronçonnage	12
Figure I.15 : Le dressage	13
Figure I.16 : Le rainurage.....	13
Figure I.17 : Le filetage.....	14
Figure I.18 : Le chanfreinage	14
Figure I.19 : Le perçage	15
Figure I.20 : L'alésage	15
Figure I.21 : Arêtes et parties actives d'un outil de tournage	16
Figure I.22 : Mouvement relatif outil/ pièce en tournage.....	17
Figure I.23 : Angles du taillant (outil en main).....	18
Figure I.24 : Angles du taillant (outil en travail).....	18
Figure I.25 : Plaquettes.....	19
Figure I.26 : Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant.....	20
Figure I.27 : Critère d'usure V B	23
Figure I.28 : Types d'avance.....	27
Figure I.29 : Les profondeurs de passe.....	27
Figure I.30 : Paramètres géométrique de coupe	28

CHAPITRE II : RUGOSITE DE SURFACE

Figure II.1 : Défauts de surface	30
Figure II.2 : Défauts de surface d'ordre 1	32
Figure II.3 : Défauts de surface d'ordre 2	33
Figure II.4 : Défauts de surface d'ordre 3	34
Figure II.5 : Défauts de surface d'ordre 4	34
Figure II.6 : Profil d'une surface	35
Figure II.7 : Ligne moyenne arithmétique.....	36
Figure II.8 : Hauteur maximale du profil R_t	38
Figure II.9 : Hauteur maximale moyenne R_z	40
Figure II.10 : Profil total caractérisé par les critères : W_i , W_{max} , A_{W_i} et R_{max} et largeur d'entaille.....	42
Figure II.11 : Paramètre λ lié à la longueur de bas	43
Figure II.12 : Paramètres liés à la longueur d'évaluation.....	44
Figure II.13 : Paramètres liés à la distribution d'amplitude	45
Figure II.14 : Rugosimètre	46
Figure II.15 : Mesure des états de surface.....	46
Figure II.16 : Opération de rectification.....	47
Figure II.17 : Technique de superfinition pour obtenir une surface à très faible rugosité	49
Figure II.18 : Galetage.....	51
Figure II.19 : Lubrification.....	52
Figure II.20 : Fluide d'usinage	54
Figure II.21 : Coupeaux	55
Figure II.22 : Symbole graphique de l'état de surface	57
Figure II.23 : Exemple de symbolisation	57

CHAPITRE III : DISCUSSION ET INTERPRETATION DES

RESULTATS

Figure III.1 : Tour universel.....	60
Figure III.2 : Outil coudé à 45° à chariotage et à dressage	61
Figure III.3 : Dessin de définition de la pièce	62
Figure III.4 : Eprouvette d'essai en acier E 24	63
Figure III.5 : Rugosimètre	63
Figure III.6 : Influence de l'avance sur la rugosité de surface lors d'un usinage à sec (1 ^{er} essai)	66
Figure III.7 : Influence de l'avance sur la rugosité de surface lors d'un usinage à sec (2 ^{ème} essai).....	66
Figure III. 8 : Influence de l'avance sur la rugosité de surface lors d'un usinage à sec.....	67
Figure III.9 : Influence de l'avance sur la rugosité de surface lors d'un usinage avec lubrification	68
Figure III.10 : Influence de l'avance sur la rugosité de surface	69
Figure III.11 : Cyber SCAN CT 100.....	70
Figure III.12 : Rugosité de surface vue en 3 D lors d'un usinage à sec (1)	72
Figure III.13 : Profilographe en perspective de la surface usinée à sec (1)	73
Figure III.14 : Profilographe en perspective de la surface usinée à sec (1)	74
Figure III.15 : Rugosité de surface vue en 3 D lors d'un usinage à sec (2)	74
Figure III.16 : Profilographe en perspective de la surface usinée à sec (2)	75
Figure III.17 : Profilographe en perspective de la surface usinée à sec (2)	76
Figure III.18 : Rugosité de surface vue en 3D lors d'un usinage à sec (3)	77
Figure III.19 : Profilographe en perspective de la surface usinée à sec (3)	78
Figure III.20 : Profilographe en perspective de la surface usinée à sec (3)	79
Figure III.21 : Rugosité de surface vue en 3D lors d'un usinage avec lubrification (1)	79
Figure III.22 : Profilographe en perspective de la surface usinée avec lubrification (1)	80
Figure III.23 : Profilographe en perspective de la surface usinée avec lubrification (1)	81
Figure III.24 : Rugosité de surface vue en 3D lors d'un usinage avec lubrification (2)	82
Figure III.25 : Profilographe en perspective de la surface usinée avec lubrification (2)	83
Figure III.26 : Profilographe en perspective de la surface usinée avec lubrification (2)	84
Figure III.27 : Rugosité de surface vue en 3D lors d'un usinage avec lubrification (3)	84
Figure III.28 : Profilographe en perspective de la surface usinée avec lubrification (3)	85
Figure III.29 : Profilographe en perspective de la surface usinée avec lubrification (3)	86



INTRODUCTION GENERALE



INTRODUCTION GENERALE

Historiquement, la recherche sur l'usinage c'est articulée sur deux aspects : le premier concerne le développement technologique qui permet d'améliorer la productivité et la qualité des pièces finies, le deuxième est la modélisation qui permet la prédiction des efforts de coupe, des champs de température et des propriétés des surfaces finies.

Cependant, le processus de fabrication, l'usinage, joue un rôle important sur la qualité des surfaces réalisées. La complexification constante des systèmes de fabrication et la concurrence amènent les technologies d'usinage à se développer rapidement. Les machines deviennent de plus en plus rapides et puissantes dans le but d'obtenir des gains de productivité.

Le domaine de la fabrication mécanique est très vaste, commençant par la plus petite pièce à la plus grande. Tout système mécanique est composé d'un ensemble de pièce liée entre elles, et en mouvement les unes par rapport aux autres, sont soumises aux frottements, ce qui nécessite la lubrification des surfaces en contact pour éviter l'usure rapide. En général, tous les procédés de fabrication mécanique ont pour objectif l'amélioration des caractéristiques mécanique, et géométriques des surfaces (surfaces obtenues), afin qu'elles répondent aux exigences techniques et aux conditions de fonctionnement. Toutes les surfaces ne sont pas parfaitement lisses, elles portent toujours les empreintes d'outil de mouvement de l'outil, ou des vibrations de la machine-outil lors de l'usinage, ce qui engendre des défauts de formes sur la surface en l'occurrence la rugosité.

Dans cette perspective, l'objectif de ce travail de recherche a consisté à étudier l'influence de l'avance sur l'état de surface d'un acier de nuance E 24.

Pour permettre une meilleure illustration de notre travail, le présent mémoire est structuré sur un éventail d'informations répartis en trois chapitres :

- La première partie a concerné une recherche bibliographique abordant des généralités sur l'usinage essentiellement le tournage comportant notamment des définitions, principe et les différents opérations de tournage, les différents types de tours, les conditions de coupe parmi eux la vitesse de coupe, l'avance, profondeur de passe, etc.
- La deuxième partie concerne la rugosité notamment l'aspect rugosité de surface, la mesure de rugosité ainsi que les technique d'amélioration des états de surface. Nous avons abordé aussi la lubrification et les liquide de coupe et leurs rôle, dont on ne peut s'en passer, car elle améliore nettement la qualité de surface et augmente la durée de vie de l'outil.
- La dernière partie est une partie expérimentale qui traite des données et des résultats ainsi que une interprétation exhaustive des paramètres à savoir l'avance ainsi que la lubrification et leur influence sur la rugosité

Le mémoire s'achève par une conclusion générale mettant en avant les principaux points retenus durant ce travail.



CHAPITRE I :

GENERALITE SUR L'USINAGE



I.1 Introduction

L'usinage est une série de processus qui permettent de fabriquer une pièce en enlevant de la matière. C'est l'utilisation de machines-outils pour enlever de la matière afin que l'ébauche d'origine ait la forme et la taille souhaitées. Avec cette technique, nous obtenons des pièces de haute précision.

Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est obtenu par la combinaison de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : mouvement de coupe (vitesse de coupe) et mouvement d'avance (vitesse d'avance). Il existe deux manières de générer la surface souhaitée : travailler avec des outils de formes ou travailler avec des outils d'enveloppes. Dans le cas d'usinage au gabarit, l'arête tranchante de l'outil détermine la surface obtenue. Dans le cas d'un travail enveloppant, c'est la combinaison des mouvements de coupe et d'avance qui définit la surface finale.

De manière générale, le but de tout procédé de fabrication mécanique est d'améliorer les Propriétés mécaniques et géométriques des surfaces à usiner.

I.2 Tournage mécanique

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe, il consiste à réaliser des pièces dont les formes sont issues d'une révolution d'un profil autour d'un axe, créant une pièce tel qu'un cylindre, un cône, une toupie ou une quille, etc. Ce profil est généré par le déplacement d'outils coupants sur un plan virtuel xz, l'axe z étant l'axe de révolution. Le tournage est un procédé d'usinage par enlèvement de matière à partir d'un brut, volume de départ dans lequel on souhaite façonner la pièce à usiner. On nomme tour une machine utilisant ce procédé.

Pour générer un mouvement de coupe, un moteur électrique entraîne en rotation une broche sur laquelle un dispositif de serrage (mandrin, pince...) Assure le maintien du "brut" lors de l'usinage. Des chariots rigides permettent de déplacer les outils coupants sur les axes x et z pour les amener au contact du brut, créant le mouvement d'avance. Cette combinaison de mouvements permet l'enlèvement de matière sous forme de copeaux. Il est également possible de percer sur un tour.

[6]



Figure I.1 : Tournage mécanique [7]

I.3 Principe de tournage

Le mouvement de coupe est obtenu par la rotation de la pièce à produire, retenue par un mandrin ou une pince spécifique, tandis que le mouvement d'avance est obtenu par le déplacement de l'outil de coupe. La combinaison de ces deux mouvements permet d'enlever de la matière sous forme de copeaux. [8]

Dans son mouvement, la pointe de l'outil décrit une ligne appelée génératrice, qui transforme la pièce en un corps de révolution, en modifiant le déplacement de l'outil (mouvement radial), tous les corps de révolution peuvent être obtenus.



Figure I.2 : Principe de tournage [9]

I.4 Machine outil pour tournage

Le tour est une machine-outil permettant la production de pièces mécaniques par enlèvement de copeaux (usinage). Suivant sa conception, il permet un nombre varié d'opérations allant du tournage mécanique simple au polygonale. [10]

La pièce à usiner est placée dans le mandrin et serrée par l'intermédiaire des mors. Un moteur permet la mise en rotation du mandrin fixé sur la broche. L'outil coupant, est positionné dans un porte-outil et serré à l'aide de vis. Le porte-outil est mis en place sur une tourelle porte-outils. Le chariot transversal et le longitudinal assurent ainsi les mouvements de l'outil par des moteurs d'avance. [11]

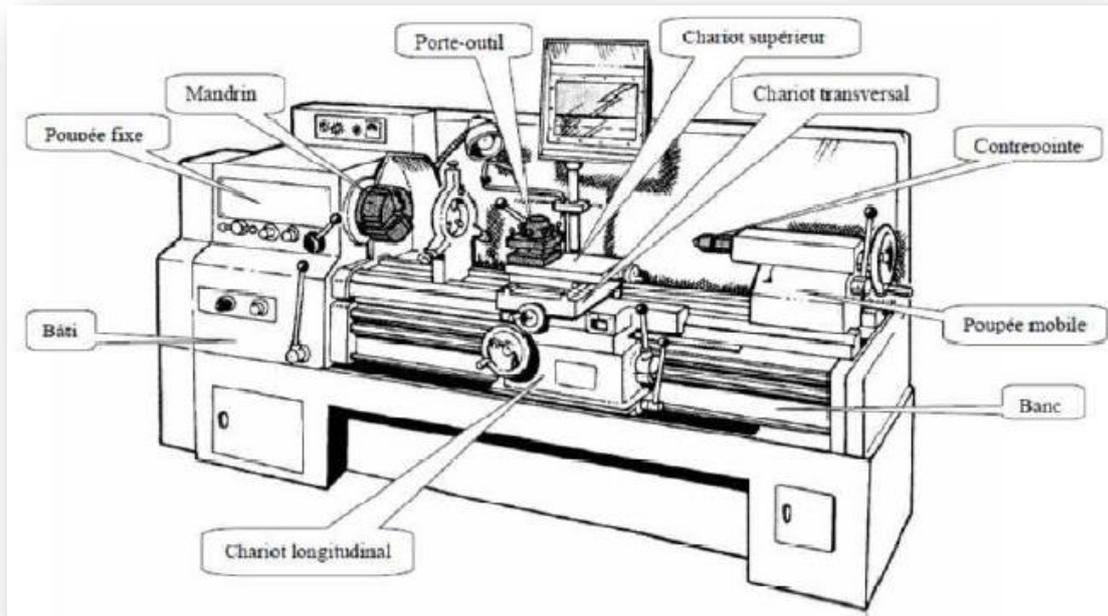


Figure I.3 : Composante d'un tour (machine - outil) [1]

I.5 Différents types de tours

Afin de répondre à tous les besoins de l'industrie (complexité des pièces, temps d'usinage, capacités), les tours ont évolué. Certains tours sont si complexes qu'ils peuvent être une alternative aux centres d'usinage. [11]

Voici les principaux types de tours :

I.5.1 Les tours parallèles à charioter et à fileter

Ces machines sont utilisées pour les travaux unitaires ou de petites et moyennes séries sur des pièces très simples. Ces tours sont peu flexibles. Seules les surfaces dont les génératrices sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche sont réalisables en travail d'enveloppe. [4]



Figure I.4 : Tour parallèle à charioter et à fileter

I.5.2 Les tours à copier

Ils permettent l'usinage de pièces par reproduction, à partir d'un gabarit, grâce à un système de copiage hydraulique qui pilote le déplacement du chariot transversal. C'est une machine assez flexible qui peut convenir pour des travaux de petites à grandes séries. La génératrice des surfaces de révolution peut être quelconque. [4]



Figure I.5 : Tour a copié

I.5.3 Les tours semi-automatiques

Ce sont des tours équipés d'un traînard semblable à celui d'un tour parallèle avec une tourelle hexagonale munie de 6 postes d'outils animée d'un mouvement longitudinal contrôlé par des butées. Les outillages spécialement conçus pour la machine permettent des opérations simples et précises. La commande de ces tours peut être manuelle ou en partie 5 automatique. La flexibilité de ces machines est très limitée. On les utilisera pour des travaux de moyenne série. [4]

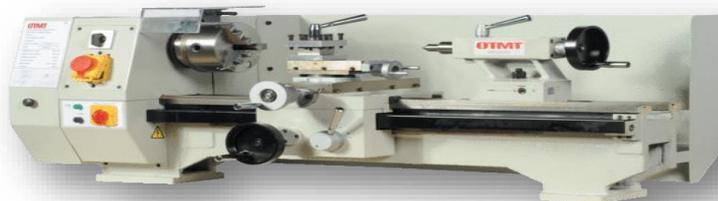


Figure I.6 : Tour semi-automatique

I.5.4 Les tours automatiques

Elles conviennent pour les très grandes séries. Ces tours sont entièrement automatiques. Ces machines n'ont aucune flexibilité.

Plusieurs outils sont montés tangentiellement à la pièce. Les mouvements sont obtenus par des cames qui donnent la vitesse d'avance et la course de chaque outil. Une came est spécifique à une opération et à une pièce. [4]



Figure I.7 : Tour automatique universel [12]



Figure I.8 : Tour automatique CNC [13]

I.5.5 Tour conventionnel

Ce sont les tours de base. Les actions sont réalisées par des opérateurs qui doivent ajuster divers paramètres et initier des opérations. [11]



Figure I.9 : Tour conventionnel

I.5.6 Tour automatique (mono broche ou multibroche)

Les tours automatiques peuvent usiner des pièces selon les paramètres sans aucune intervention de l'opérateur. Avec plusieurs broches, les tours automatiques peuvent usiner plusieurs pièces en même temps. [11]

I.5.7 Tours à commande numérique

Le tour à commande numérique est équipé d'une commande numérique qui pilote la machine en suivant un programme réalisé manuellement ou automatiquement.

La structure d'un tour à commande numérique est plus complexe et dépend de la configuration de la machine.

Les tours à commande numérique sont donc caractérisés par les éléments suivants :

- Nombre de tourelles
- Tourelles motorisées ou non
- Nombre d'outils sur la tourelle
- Type de la commande numérique

Il existe également des centres de tournage fraisage permettant en plus des opérations de tournage, de réaliser du fraisage.

[11]



Figure I. 10 : Tour parallèle à charioter et à fileter à commande numérique [14]

I.5.8 Tours verticaux

Les tours verticaux sont utilisés pour usiner des pièces très lourdes et de gros diamètre (de moins d'un mètre jusqu'à 10 mètres. Dans ce cas, la pièce est posée sur un plateau tournant et l'usinage s'effectue par l'intermédiaire d'un ou deux chariots qui se déplacent. Ces machines peuvent également être équipées d'une commande numérique. [11]



Figure I.11 : Tour vertical [15] [11]

I.6 Différentes opérations de tournage

Au cours du processus de tournage mécanique, diverses opérations peuvent être effectuées sur la pièce pour lui donner la forme souhaitée. Ces opérations peuvent être classées comme externes ou internes. Les opérations externes modifient le diamètre extérieur de la pièce, tandis que les opérations internes en modifient le diamètre intérieur.

Les opérations suivantes sont chacune définies par le type d'outil de coupe utilisé et la trajectoire de celui-ci.

[8]

I.6.1 Les opérations de tournage extérieur

I.6.1.1 Le tournage

Un outil de coupe à une seule pointe se déplace axialement, le long de la pièce, en enlevant de la matière pour former différentes caractéristiques telles que des encoches, des cônes, des chanfreins et des contours. Ces caractéristiques sont généralement usinées à une faible profondeur de coupe radiale et des passes multiples sont effectuées jusqu'à ce que le diamètre voulu soit atteint. [8]

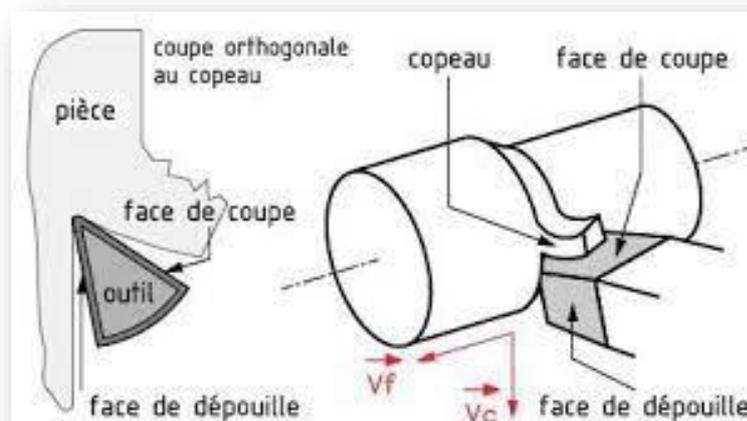


Figure I.12 : Tournage [2]

I.6.1.2 Chariotage

Le chariotage est une opération consistant à usiner sur un tour un cylindre d'un certain diamètre par déplacement de l'outil de coupe suivant un axe parallèle à l'axe de rotation de la pièce. [16]

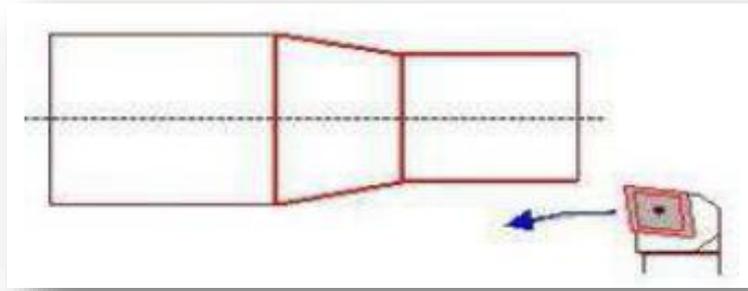


Figure I.13 : Le chariotage [5]

I.6.1.3 Le tronçonnage

Un outil de coupe à une seule pointe se déplace radialement, sur le côté de la pièce, et continue jusqu'à ce que le centre ou le diamètre intérieur de la pièce soit atteint, ce qui permet de tronçonner ou de couper une partie de la pièce. [8]

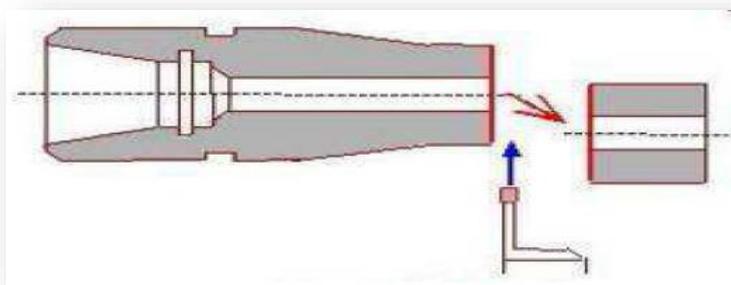


Figure I.14 : Le tronçonnage [5]

I.6.1.4 Le dressage (externe et interne)

Un outil de coupe à une seule pointe se déplace radialement, le long de l'extrémité de la pièce, enlevant une fine couche de matériau pour obtenir une surface plane et lisse. La profondeur de la face, généralement très petite, peut être usinée en un seul passage ou peut être atteinte en usinant à une profondeur de coupe axiale plus petite et en effectuant des passages multiples. [8]

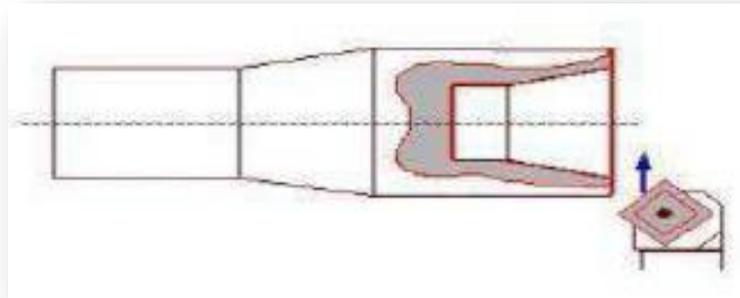


Figure I.15 : Le dressage [5]

I.6.1.5 Le rainurage (externe et interne)

Un outil de coupe à une seule pointe se déplace radialement, sur le côté de la pièce, en découpant une rainure de largeur égale à celle de l'outil de coupe. Des coupes multiples peuvent être effectuées pour former une rainure plus large que la largeur de l'outil et des outils de coupe de formes spéciales peuvent être utilisés pour créer des rainures de géométrie variable. [8]

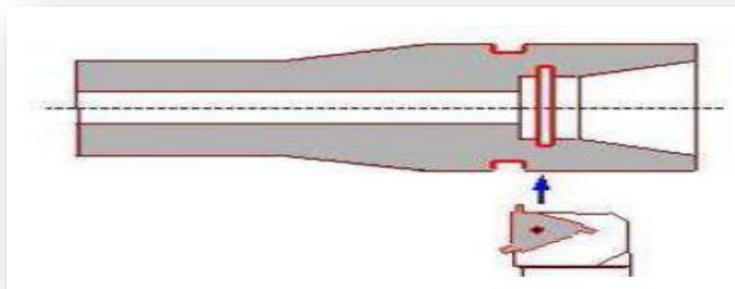


Figure I.16 : Le rainurage [5]

I.6.1.6 Le filetage (externe et interne)

Un outil de coupe à une seule pointe, généralement doté d'un angle de coupe de 60 degrés, se déplace axialement, le long du côté de la pièce, coupant les filets dans la surface extérieure. Les filets peuvent être coupés à une longueur et un pas spécifiés et peuvent nécessiter plusieurs passes pour être formés. [8]

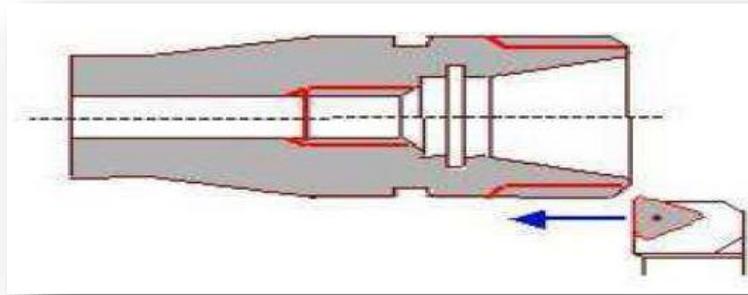


Figure I.17 : Le filetage [5]

I.6.1.7 Chanfreinage (externe et interne)

Opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle vif.

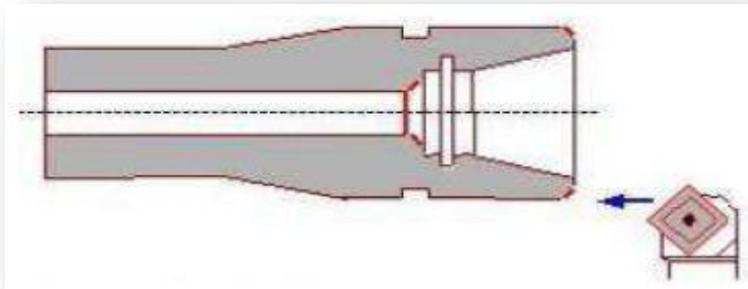


Figure I.18 : Le chanfreinage [5]

I.6.2 Les opérations de tournage intérieur

I.6.2.1 Le perçage

Un foret entre dans la pièce par l'extrémité et découpe un trou d'un diamètre égal au sien. [8]

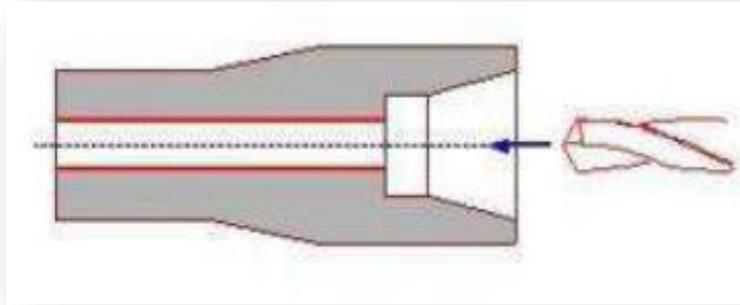


Figure I.19 : Le perçage [5]

I.6.2.2 L'alésage

Un outil de coupe pénètre axialement dans la pièce et taille la matière le long d'une surface interne pour former différentes caractéristiques telles que des entailles, des cônes, des chanfreins et des contours.

L'outil d'alésage est généralement un outil de coupe à pointe unique, qui peut être réglé pour couper le diamètre souhaité en utilisant une tête d'alésage réglable. L'alésage est généralement effectué après le perçage d'un trou afin d'en élargir le diamètre ou d'obtenir des dimensions plus précises. [8]

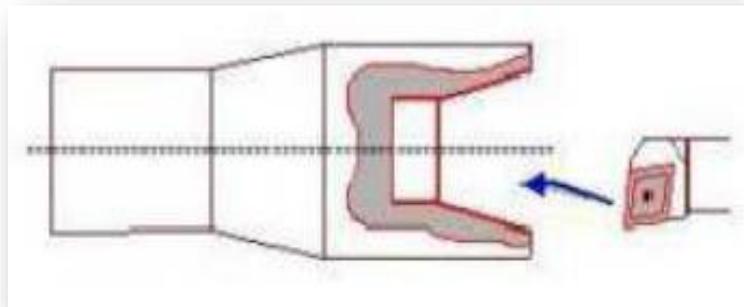


Figure I.20 : L'alésage [5]

I.6.2.3 Le taraudage

Un outil de coupe pénètre axialement dans la pièce par l'extrémité et coupe des filets internes dans un trou existant. [8]

I.7 Outil

I.7.1 Faces et arêtes de l'outil

Un outil coupant est constitué d'un corps d'outil et peut comporter une ou plusieurs

Parties actives, intersection de deux surfaces (α_1 , α_2). La partie active peut être constituée du même matériau que le corps, on parle alors d'outils monoblocs (carbures et aciers rapides) ou d'un matériau différent (inserts rapportés ou plaquettes pour les carbures, les cermet, les céramiques, les poly cristallins de bore ou de diamant).

En plus de cette description de la géométrie locale des outils, il existe une norme (iso 1831) permettant de décrire les différentes parties constitutives des outils de tournage à plaquettes rapportées, systématiquement utilisés aujourd'hui. Cette description indique une large part des caractéristiques des outils, à l'exception de la géométrie locale des brises copeaux frittés sur les faces de coupe, et à l'exception de la composition des plaquettes et de leurs revêtements. Ce sont en fait les deux points clés qui font la spécificité des fabricants d'outils (impossible à normaliser).

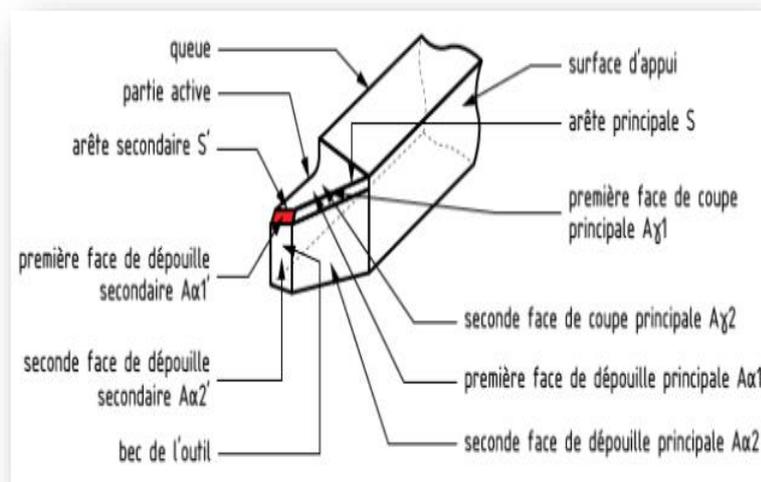


Figure I.21 : Arêtes et parties actives d'un outil de tournage [5]

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 coupées et engendrées.

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.

Généralement, un outil possède un mouvement de coupe et un mouvement d'avance. On en déduit des lors un vecteur résultant du mouvement relatif outil/ pièce exprime par le vecteur V_e . A partir de là, on peut définir deux systèmes d'angles d'un outil de coupe. On définit soit les angles d'outil « en main » par rapport à la direction supposée de coupe V_e (repère nécessaire à la fabrication des outils), soit les angles d'outils « en travail » par rapport à la direction réelle de coupe V_c (repère nécessaire pour connaître les angles effectifs durant la coupe). A l'aide de ces repères, on établit une série de plans et d'angles normalisés permettant de décrire la géométrie locale des outils.

[5]

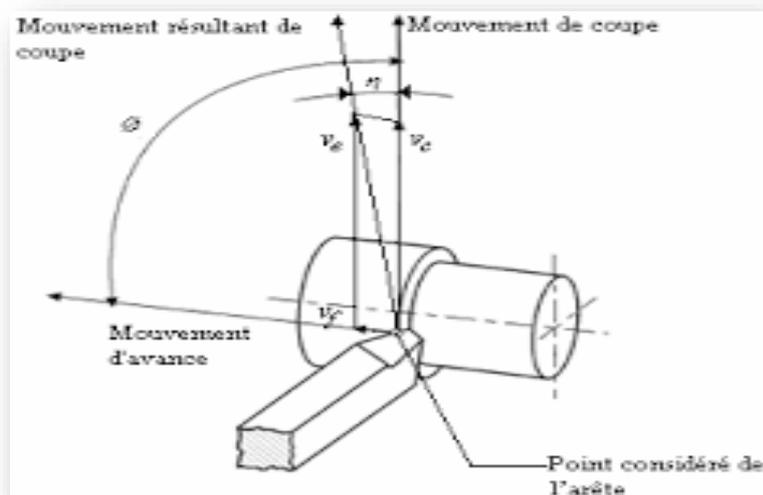


Figure I.22 : Mouvement relatif outil/ pièce en tournage [5]

I.7.2 Angles de l'outil

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 suivante illustre, dans le système de référence outil en main, les trois angles principaux du taillant, l'angle de dépouille α , l'angle de taillant β et l'angle de coupe γ .

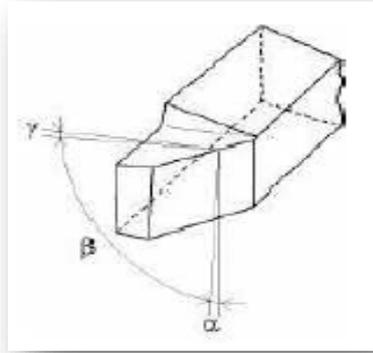


Figure I.23 : Angles du taillant (outil en main) [5]

La figure suivante illustre ces mêmes angles dans les systèmes de référence outil en travail :

- Outil à taille en bout (gauche) et outil à taille de côté ou latérale (droite).

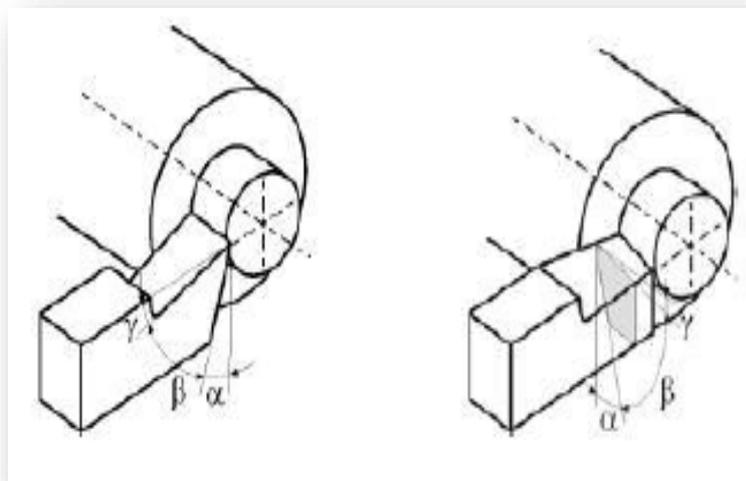


Figure I.24 : Angles du taillant (outil en travail) [5]

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° .

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

[5]

I.7.3 Outil de coupe à plaquette rapportée

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

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

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

- Matière de la pièce, usinabilité.
- Configuration de la pièce : forme, dimension, surépaisseurs d'usinage.
- Limitations : tolérances, état de surface.
- Machine : type, puissance, conditions d'utilisation et caractéristiques.
- Stabilité, rigidité de la prise de pièce et de la pièce.

[5]



Figure I.25 : Plaquettes [5] [18] [19]

I.7.4 Matériaux de l'outil

La partie active des outils de coupe et donc les matériaux servant à leur constitution doivent posséder certaines propriétés :

- Une bonne résistance mécanique au frottement - résistance à l'usure.
- Une bonne résistance aux chocs - ténacité.
- Une bonne résistance à la pénétration - dureté.
- Une bonne résistance à la chaleur - garder ces propriétés à haute température (par exemple dureté à chaud).
- Une bonne résistance à la pression.
- Une grande stabilité chimique vis-à-vis du matériau usiné et de l'atmosphère environnante (air, liquide de coupe, etc.).
- Une faible adhésion avec le matériau usiné sous haute pression et haute température.
- Un bas prix d'achat et de mise en forme, ainsi que l'abondance des éléments
- Composition.

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

[5]

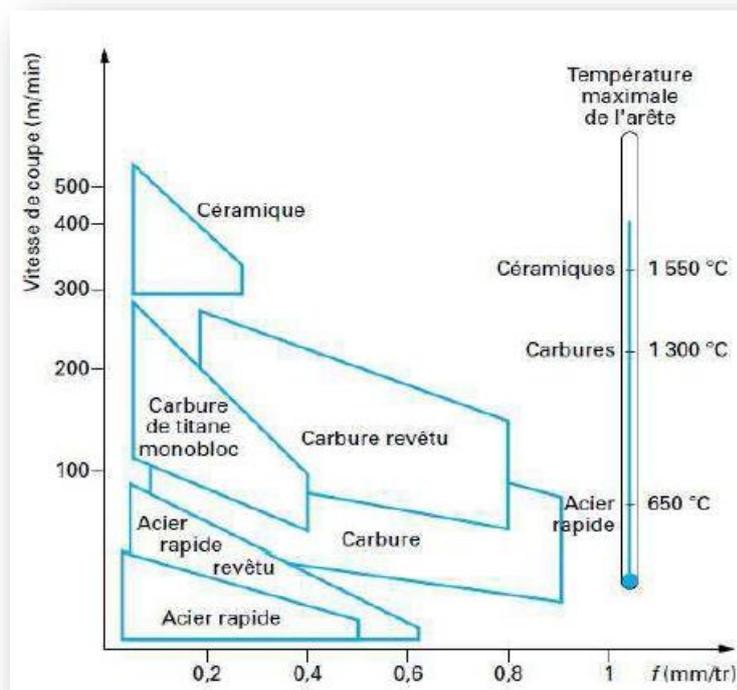


Figure I.26 : Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant [5]

I.7.5 Durée de vie d'un outil de coupe

Il n'existe pas de loi mathématique simple permettant de calculer la durée de vie d'un outil.

Elle est caractérisée par le temps mis pour atteindre la valeur limite du critère d'usure considérée dans des conditions de coupe données.

I.7.5.1 Type d'usure

➤ Usure en dépouille :

L'abrasion au niveau de la face de dépouille représente une usure courante après un certain temps d'utilisation.

Cause :

- Vitesse de coupe trop élevé.
- Choix de la nuance de carbure de la pastille.
- Avance non adapté.

Remèdes :

- Réduction de la vitesse de coupe.
- Nuance de carbure résistante à l'usure.
- Avance correspondante à la vitesse de coupe et à la profondeur de passe.

➤ Ecaillage :

Cause :

- Nuance résistante à l'usure.
- Vibrations.
- Avance ou profondeur de passe importante

Remèdes :

- Nuance plus tenace.
- Géométrie de coupe négative avec brise-copeaux.
- Amélioration de la rigidité du système M.D.P.O.

➤ Usure en cratère :

Le copeau chaud provoque une cratérisation de la plaquette sur la face de coupe.

Cause :

- Vitesse de coupe trop élevée et/ou avance trop importante.
- Angle de coupe trop faible.
- Nuance de carbure à résistance à l'usure trop faible.
- Mauvaise lubrification.

Remèdes :

- Réduction de la vitesse de coupe et/ou d'avance.
- Nuance de carbure plus résistante à l'usure.
- Augmentation du débit et/ou la pression du liquide de coupe, contrôle du jet.
- Nuance plus résistante à l'usure.

➤ Déformation plastique :

La combinaison d'une température d'usinage élevée et d'une charge mécanique peut provoquer une déformation plastique.

Cause :

- Température trop élevée, d'où un affaissement du substrat.
- Endommagement du revêtement.

Remèdes :

- Réduction de la vitesse de coupe.
- Nuance de carbure plus résistante à l'usure.
- Amélioration de la lubrification.

➤ Arête rapportée :

Lorsqu'une température de coupe trop faible empêche le glissement du copeau, de la manière se colle à l'arête de coupe.

Cause :

- Vitesse de coupe très faible.
- Angle de coupe très petit.
- Matériaux de coupe inadaptés.
- Absence de lubrification.

Remèdes :

ADJABI Baha - Eddine

Master fabrication mécanique et productique - 2022 « Université Badji - Mokhtar Annaba »

- Augmentation de la vitesse de coupe.
- Augmentation de l'angle de coupe.
- Revêtement TiN.
- Vérification du dosage d'émulsion.

➤ Rupture de plaquette :

Une usure de la plaquette peut altérer son utilisation.

Cause :

- Surcharge du matériau de coupe.
- Manque de stabilité.
- Angle tranchant inapproprié.

Remèdes :

- Matériau plus tenace.
- Arête chanfreinée.
- Géométrie plus précise.
- La durée de vie de l'outil est mesurée d'après l'usure de l'angle de dépouille dans la zone b V B e

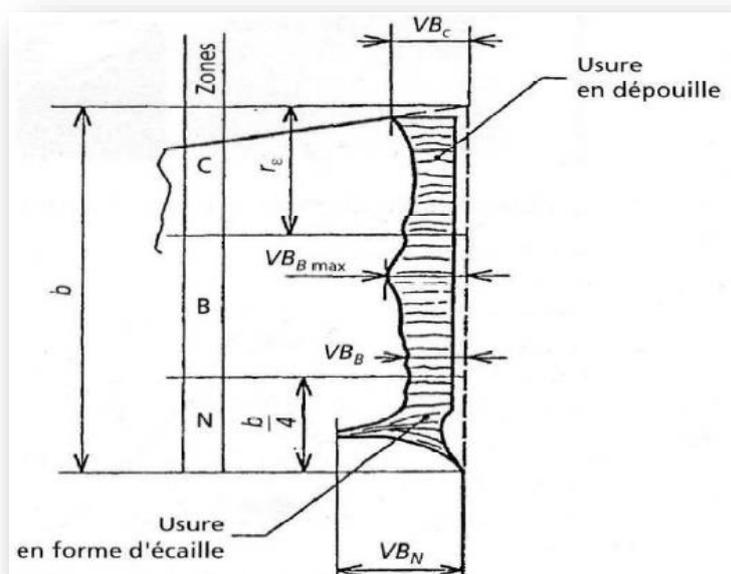


Figure I.27 : Critère d'usure V B [5]

En fait la durée de vie de l'outil est fonction des différents paramètres, soit :

- Les conditions de coupe
- Le matériau et la géométrie de l'outil
- Le matériau, et l'état physique de la pièce
- Lubrification.

Considération et on établit des lois d'usure pour des outils parfaitement définis pour un matériau usiné donné et dans des conditions de lubrification déterminées.

On arrive donc des lois d'usure de la forme :

$$T = f V_c f_{ap}$$

[5]

Remarque :

La vitesse de coupe étant en fait le paramètre le plus important on trouve aussi des lois d'usure sous la forme : $T = f(V_c)$

I.8 Condition de coupe

I.8.1 Vitesse de coupe

La vitesse de coupe V_c (m/min) représente l'espace parcouru (en mètres) par l'extrémité d'une dent de l'outil en une minute.

En tournage, la vitesse de coupe est la vitesse relative de l'outil par rapport à la pièce. Il s'agit donc de la vitesse tangentielle au point de la pièce coïncidente avec la pointe de l'outil. Cette vitesse qui s'exprime toujours en mètres par minute (m/min) se calcule ainsi :

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

Equation I.1

Avec :

- ✓ V_c : vitesse de coupe en m/min
- ✓ d : diamètre en **mm** au point d'usinage
- ✓ N : vitesse de rotation de la pièce en tr / min

En permutant les termes de la formule précédente, on obtient :

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

Equation I.2

Et c'est cette vitesse de rotation N que l'on règle sur la machine. Il faut donc connaître V_c dont la valeur est le plus souvent issue de méthodes empiriques.

La vitesse de coupe est déterminée en fonction de différents facteurs :

- de la matière à usiner : en général plus elle est tendre et plus la vitesse est élevée
- de la matière de l'outil de coupe
- de la géométrie de l'outil de coupe
- du type d'usinage : ébauche, finition, filetage, etc.
- du lubrifiant, qui permet une augmentation de la vitesse
- de la qualité du tour : plus il est rigide, plus il supportera des vitesses élevées

[20]

I.8.2 Avance

En tournage, l'avance est la vitesse avec laquelle progresse l'outil suivant l'axe de rotation pendant une révolution de la pièce, cette vitesse est déterminée expérimentalement en fonction des critères précédemment cités. Cela correspond, en première approximation à l'épaisseur du copeau. On règle l'avance directement sur la machine.

À ne pas confondre avec la formule de calcul de l'avance en fraisage, qui est :

$$V_f = f_z Z N$$

Equation I.3

Avec :

- ✓ V_f : avance en mm/min
- ✓ f_z : avance par dent en mm/ (dent. Tour)
- ✓ Z : nombre de dents de la fraise
- ✓ N : fréquence de rotation réglée sur la machine en tr/min

En tournage, si on veut calculer la vitesse d'avance de l'outil, on applique cette formule :

$$V_f = f N$$

Equation I.4

Avec :

- ✓ f : avance en mm/tour
- ✓ N : fréquence de rotation réglée sur la machine en tr/min

[20]

I.8.2.1 Les types d'avances

On distingue trois sortes d'avance :

1. Avance longitudinal :

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

2. Avance transversale :

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

3. Avance oblique :

On appelle avance oblique si l'outil se déplace sous un angle par rapport à l'axe de l'ébauche. [2]

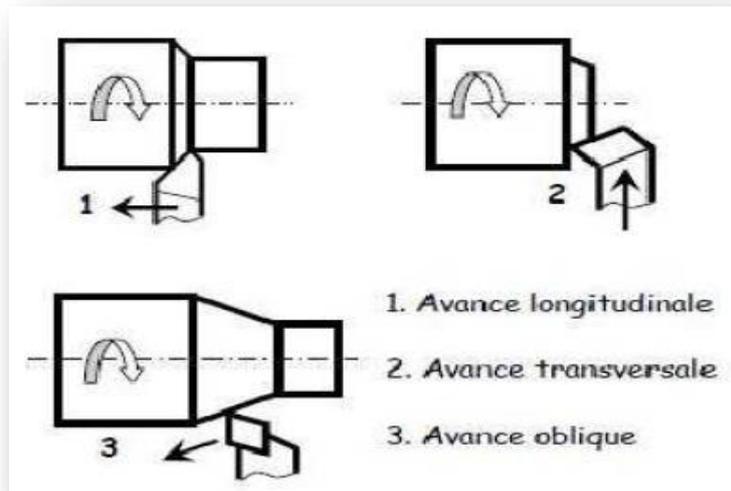


Figure I.28 : Types d'avance [2]

I.8.3 Profondeur de passe

La profondeur de passe notée a en (mm), correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas du tournage. La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil. [2]

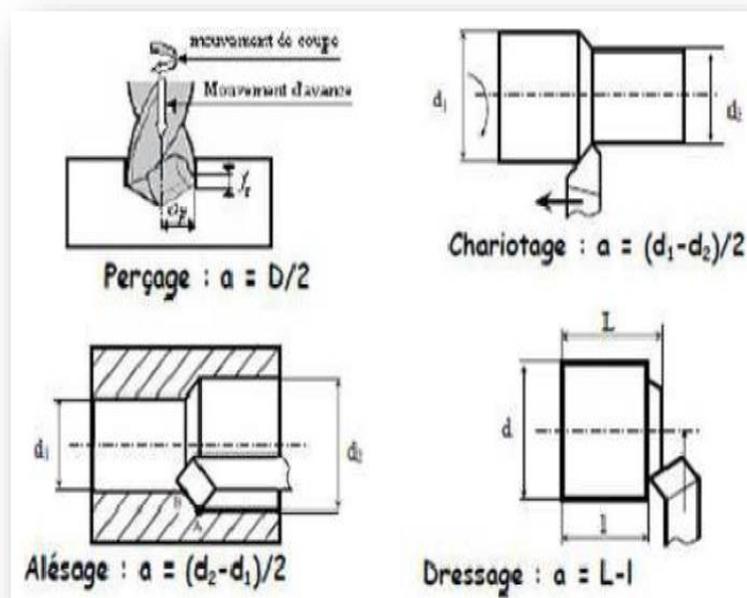


Figure I.29 : Les profondeurs de passe [2]

I.9 Paramètres géométriques de coupe

La distance entre la surface de la pièce et la surface engendrée est appelée profondeur de passe a . Cependant, afin d'arriver à la dimension finale de la pièce, on doit souvent effectuer plusieurs passes. La passe est définie comme la couche de matière de la pièce qui doit être enlevée par un passage unique de l'outil de coupe. La partie de matière usinée entre la surface de la pièce et la surface finale désirée (après avoir effectué toutes les passes nécessaires) est appelée surépaisseur d'usinage. On appelle la coupe la couche de matière qui est enlevée par une action unique de la partie active et transformée en copeaux.

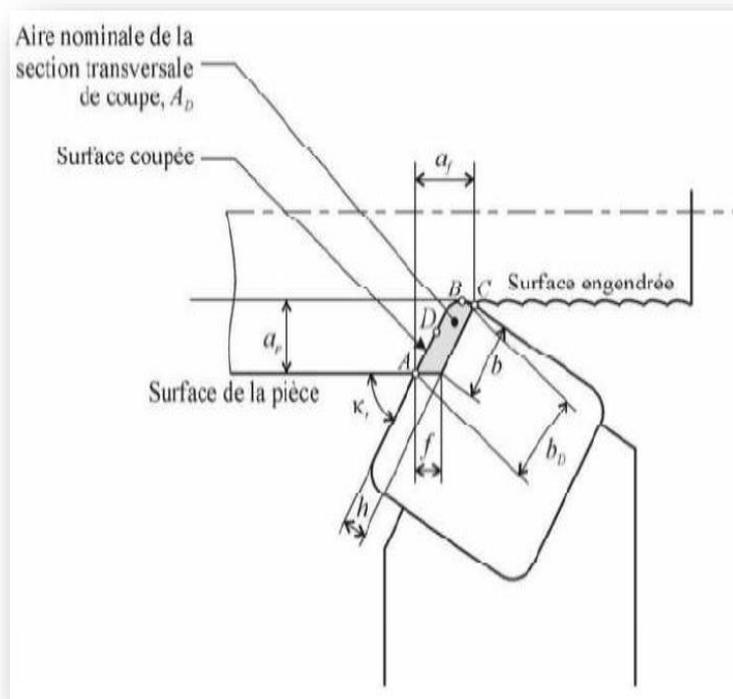


Figure I.30 : Paramètres géométrique de coupe [5]

Avec :

- ✓ a_p : Profondeur de coupe.
- ✓ a_f : Engagemement de l'arête.
- ✓ f : Avance.
- ✓ h : Épaisseur de coupe.
- ✓ b : Largeur de coupe.
- ✓ b_D : Largeur nominale de coupe.
- ✓ κ_r : Angle de direction d'arête.
- ✓ D : Point principal de l'arête.

[5]

I.10 Conclusion

Il est à conclure qu'il est important de recourir à l'usinage ainsi qu'à des essais expérimentaux pour appuyer la qualité des pièces, critère jugé important dans la fabrication mécanique.



CHAPITRE II :

RUGOSITE DES SURFACES



II.1 Introduction

Une surface usinée n'est jamais parfaite, elle a toujours des défauts car l'erreur systématique des défauts peuvent être admissible dans le processus de fabrication.

Les défauts peuvent être de forme (défauts macro-géométriques, ondulations) ou petits Les défauts (défauts géométriques microscopiques) sont appelés rugosité.

II.2 Rugosité

La rugosité concerne les défauts micro géométriques de la surface. Ils sont évalués après filtrage de la surface réelle à l'aide d'un filtre passe-haut ne retenant que les longueurs d'onde latérales les plus courtes. Les paramètres de rugosité en profilométrie commencent par la lettre majuscule R suivie d'une ou plusieurs lettres déterminant le type de paramètre. Par exemple, le paramètre 'Ra' est la rugosité moyenne arithmétique du profil obtenu par un rugosimètre. 'Rz' est la rugosité maximale du profil. La rugosité d'une pièce usinée est une caractéristique du fini de la pièce lors de l'usinage (tournage, polissage, pierrage, etc.) La cotation des états de surface en mécanique fait essentiellement référence aux défauts et aux exigences techniques pendant l'usinage. Les défauts sont des stries et des sillons creusés par les arêtes coupantes des outils (outils de tournage, fraises, meules, etc.). On distingue 2 niveaux de défauts d'état de surface :

Niveau 1 : stries périodiques

Niveau 2 : défauts aperiodiques : arrachement de matière

II.3 Les défauts d'états de surface

Une coupe longitudinale ou transversale d'une surface réelle donne un profil sur lequel on relève des défauts de plusieurs ordres de grandeur

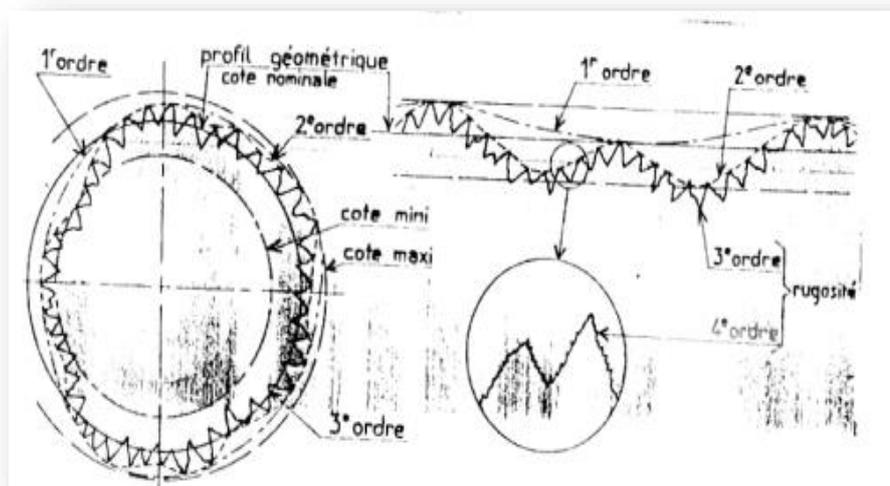


Figure II.1 : Défauts de surface [31]

Les défauts de rugosité possèdent une grande influence sur les fonctions des surfaces.

L'état de rugosité dépend en effet des caractéristiques très diverses telles que :

- Le frottement de glissement et de roulement,
- La résistance au matage,
- L'étanchéité,
- La résistance à l'écoulement des fluides,
- La facilité d'accrochage des revêtements,
- La résistance aux efforts alternés.

La norme AFNOR 05-515 distingue plusieurs ordres de défauts de surface, du plus grand au plus petit :

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

[5]

II.3.1 Ordre 1 : écart de forme ou de position (ligne moyenne)

Les différents types de défauts représentés par l'ordre 1 sont :

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

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

- L'étanchéité : statique (pas de mouvement entre les pièces)
- Dynamique (mouvement entre deux pièces)
- Les frottements : roulement, glissement s durée de vie des organes

Les causes de ces défauts sont :

- La déformation de la pièce avant usinage dans son système d'ablocage s la déformation de la pièce au cours de l'usinage due à l'effort exercé par l'outil sur la pièce ou due à la mauvaise inclinaison de l'outil (Montage incorrect).
- La déformation de la pièce après démontage (contraintes internes (ex : température)
- La déformation de l'outil machine due à l'action de la pièce sur l'outil.

- Les défauts au niveau des guidages.

L'évaluation de la surface :

Discontinue : comparateur (maillage) machine à mesurer tridimensionnelle continue :

Palpage, interférométrie

[5]



Figure II.2 : Défauts de surface d'ordre 1 [22]

II.3.2 Ordre 2 : ondulations périodiques

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

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

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

- La pièce, due à un mauvais équilibrage du montage sur la porte pièce
- L'outil, dû à une dent cassée au niveau de la fraise par exemple la machine.

[5]

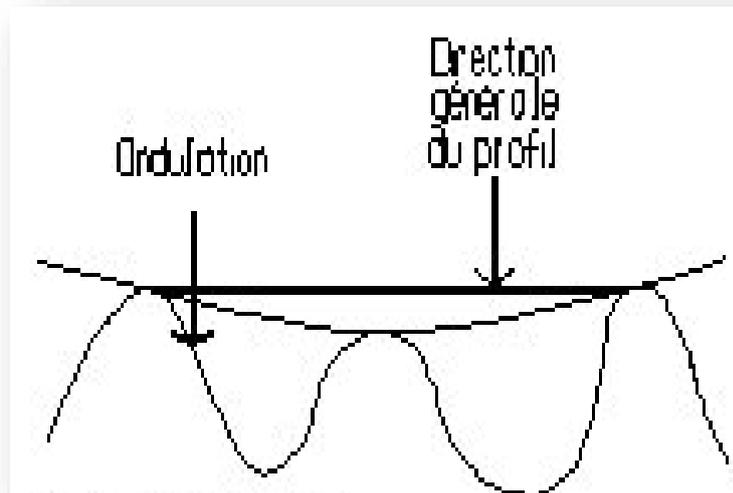


Figure II.3 : Défauts de surface d'ordre 2 [22]

II.3.3 Ordre 3 : stries ou sillons

Ils sont caractérisés par une longueur d'onde comprise entre 2/100 de millimètre et quelques 1/10de millimètres.

Ils sont causés par des vibrations haute fréquence, les traces des dents

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

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

- L'étanchéité : statique (pas de mouvement entre les pièces) dynamique (mouvement entre deux pièces)
- Les frottements fluides
- Les problèmes de revêtement (peinture...)

Les causes de ces défauts sont :

- Les phénomènes vibratoires hauts fréquence
- Les stries ou sillons dus au passage de l'outil

[5]

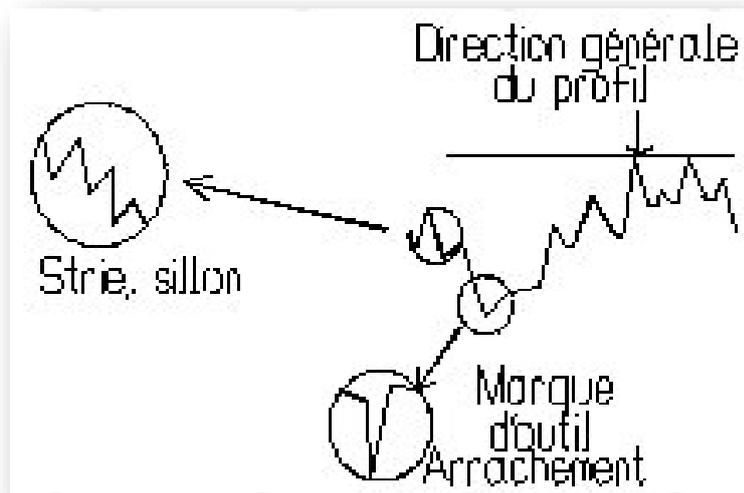


Figure II.4 : Défauts de surface d'ordre 3 [25]

II.3.4 Ordre 4 : arrachement de matière

Dépend de l'affûtage de l'outil, du type d'outil, de la lubrification, de la vitesse de coupe, de la géométrie de l'outil de coupe, du matériau de l'outil (carbure revêtu...) [5]

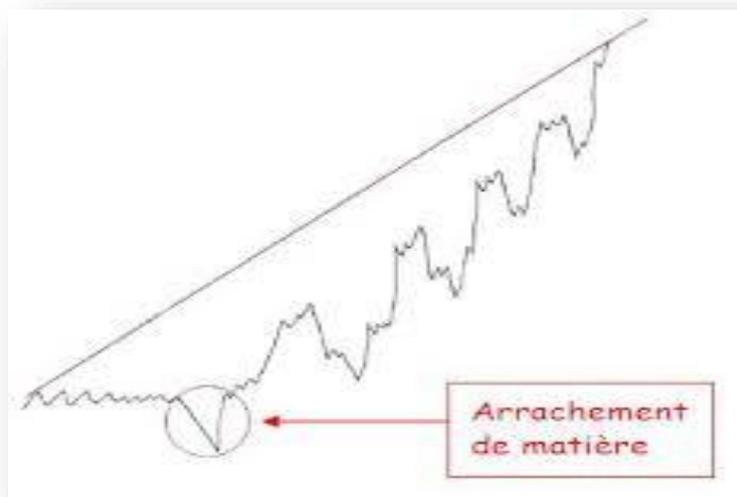


Figure II.5 : Défauts de surface d'ordre 4 [22]

II.4 Différents types de lignes

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

II.4.1 Ligne moyenne

C'est une droite ayant la direction générale du profil et qui divise le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base l , la somme des carrés des écarts à partir de cette ligne soit minimale ("ligne des moindres carrés"). [22]

II.4.2 Longueur de base, d'évaluation

La longueur de base est définie par l'outil de mesure (notée l)

La longueur d'évaluation est la longueur totale à mesurer (notée L)

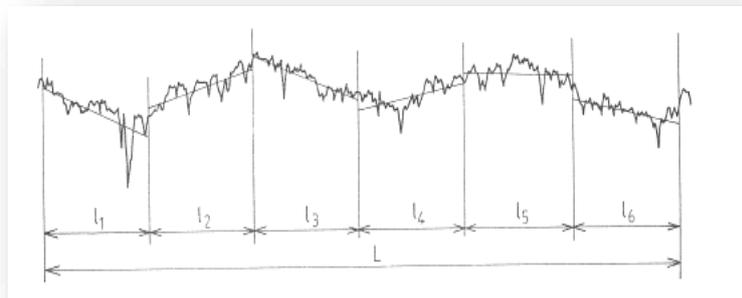


Figure II.6 : Profil d'une surface

II.4.3 Lignes de référence

Ce sont les lignes à partir desquelles les paramètres du profil sont déterminés.

En général, cette ligne n'appartient pas à la surface de référence. C'est :

- Les lignes moyennes : moyennes arithmétique
- Moyenne des moindres carrés
- Les lignes enveloppes : enveloppe supérieure
- Enveloppe inférieure

La ligne centrale arithmétique à l'intérieur de la longueur de base est : la somme des aires comprises entre elle et le profil est égale de part et d'autre.

[4]

II.4.4 La ligne des moindres carrés

C'est la ligne de référence qui a la forme du profil géométrique et qui divise le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base (l) la somme des aires entre elle et le profil soit égale de part et d'autre.

II.4.5 La ligne moyenne arithmétique

C'est la ligne de référence qui a la forme du profil géométrique et qui divise le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base (l) la somme des carrés des écarts entre elle et le profil soit minimale de part et d'autre.

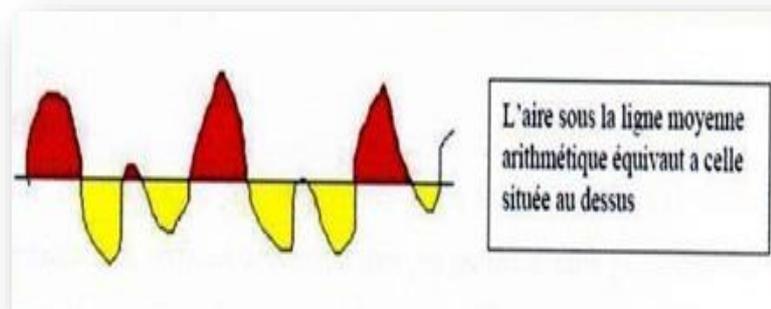


Figure II.7 : Ligne moyenne arithmétique [2]

II.4.6 La ligne enveloppe supérieure

C'est la somme des segments de droite qui joignent les points les plus hauts des saillies locales du profil.

II.4.7 La ligne enveloppe inférieure

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

II.5 Paramètres de rugosité unidimensionnelle

Les paramètres de rugosité unidimensionnelle standardisés peuvent être évalués avec l'outil la texture unidimensionnelle est séparée en ondulation (la composante de basse fréquence définissant la forme globale) et la rugosité (la composante de haute fréquence) à la fréquence de coupure.

Celle-ci est spécifiée en unités de fréquence de Nyquist, c'est-à-dire qu'une valeur de 1.0 correspond à la fréquence de Nyquist.

Dans les formules qui suivent, nous supposons que la valeur moyenne de r_j est nulle, c'est-à-dire que nous avons [4]

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

Equation II.1

II.5.1 Paramètres d'amplitude de rugosité

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

II.5.1.1 Rugosité moyenne Ra

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

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

Une manière plus ancienne de spécifier une plage de Ra s'appelle RHR. Il s'agit d'un symbole placé sur un dessin et spécifiant la valeur minimale et maximale de Ra. [4]

II.5.1.2 Rugosité moyenne quadratique Rq

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

Moyenne quadratique des écarts de hauteur sur la longueur d'évaluation et mesurés par rapport à la ligne moyenne. [4]

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

Equation II.2

II.5.1.3 Hauteur maximale du profil Rt

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

Hauteur crête-à-crête maximale. Il s'agit de la valeur absolue entre les hauteurs maximum et minimum. [4]

$$R_t = |\min r_j| (1 \leq j \leq N) + |\max r_j| (1 \leq j \leq N)$$

Equation II.3

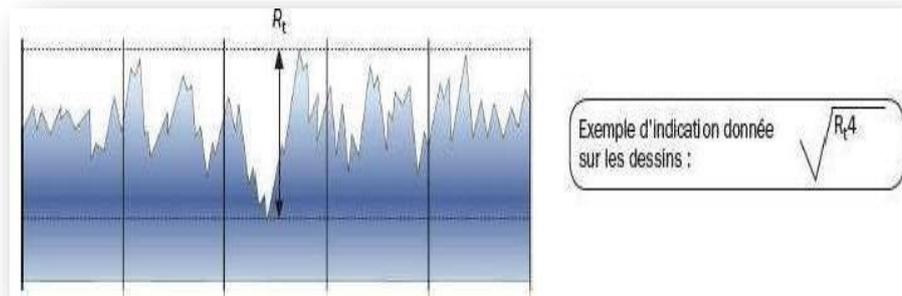


Figure II.8 : Hauteur maximale du profil R_t [4]

II.5.1.4 Profondeur minimale des vallées R_v , R_m

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

Vallée la plus profonde. Il s'agit de la profondeur de la vallée la plus profonde du profil de rugosité sur la longueur d'évaluation. [4]

$$R_v = |\min r_j| \quad (1 \leq j \leq N)$$

Equation II.4

II.5.1.5 Hauteur maximale des pics R_p

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

Pic le plus élevé. Il s'agit de la hauteur du pic le plus élevé de la longueur d'évaluation [4]

$$R_p = |\max r_j| \quad (1 \leq j \leq N)$$

Equation II.5

II.5.1.6 Amplitude moyenne R_{tm}

Profil de rugosité sur la Normes : ASME B46.1-1995, ISO 4287-1997.

Rugosité crête-à-crête moyenne. Elle est déterminée par la différence entre le pic le plus élevé et la vallée d'évaluation la plus profonde sur plusieurs échantillons le long de la longueur où R_{vm} et R_{pm} sont définis plus bas.

Pour les profils de données elle est basée sur cinq longueurs d'échantillon ($m = 5$). Le nombre d'échantillons correspond à la norme ISO. [4]

$$R_{tm} = R_{vm} + R_{pm}$$

Equation II.6

II.5.1.7 Profondeur moyenne des vallées R_{vm}

Normes : ISO 4287-1997.

Profondeur de vallée moyenne basée sur une vallée par longueur échantillonnée. La vallée la plus profonde est déterminée pour cinq longueurs échantillonnées ($m = 5$) puis ces valeurs sont moyennées. [4]

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

Equation II.7

Où :

$$R_{vi} = |\min r_j| \left((i-1) \frac{N}{m} \leq j \leq i \frac{N}{m} \right)$$

Equation II.8

II.5.1.8 Hauteur moyenne des pics R_{pm}

Normes : ISO 4287-1997.

Hauteur de pic moyenne basée sur une vallée par longueur échantillonnée. La vallée la plus profonde est déterminée pour cinq longueurs échantillonnées ($m = 5$) puis ces valeurs sont moyennées. [4]

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

Equation II.9

Où :

$$R_{pi} = |\max r_j| \left((i-1) \frac{N}{m} \leq j \leq i \frac{N}{m} \right)$$

Equation II.10

II.5.1.9 Profondeur de rugosité de base R_{3z}

Normes : ISO 4287-1997.

Distance entre le troisième plus haut pic et la troisième plus basse vallée. Un pic correspond à une portion de la surface située au-dessus de la ligne moyenne. [4]

II.5.1.10 Profondeur de rugosité moyenne R3zISO

Normes : ISO 4287-1997.

Distance entre le troisième plus haut pic et la troisième plus basse vallée par longueur échantillonnée.

La profondeur de rugosité de base est déterminée pour cinq longueurs échantillonnées puis les valeurs obtenues sont moyennées. [4]

II.5.1.11 Hauteur maximale moyenne Rz

Normes : ISO 4287-1997

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

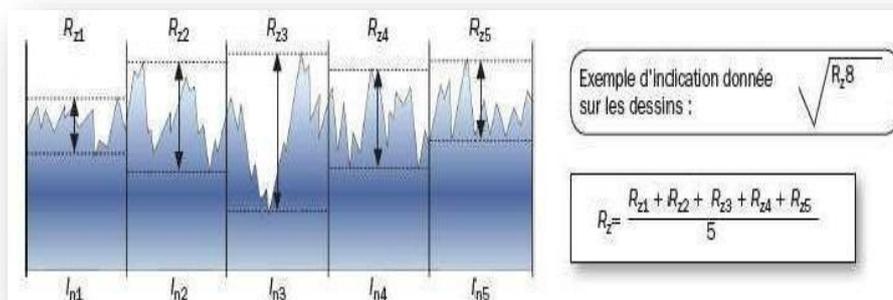


Figure II.9 : Hauteur maximale moyenne Rz [4]

II.5.1.12 Amplitude crête-à-crête moyenne RzISO

Normes : ISO 4287-1997.

Rugosité crête-à-crête moyenne basée sur un pic et une vallée par longueur échantillonnée.

L'amplitude la plus élevée est déterminée pour cinq longueurs. Les valeurs sont moyennées. Elle est identique à Rtm.

Échantillonnées puis ces Fonction de distribution d'amplitude Normes : ISO 4287-1997.

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

Distribution d'amplitude cumulée

Normes : ISO 4287-1997.

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

[4]

II.5.1.13 Asymétrie Rsk

Normes : ISO 4287-1997.

L'asymétrie est un paramètre décrivant la forme de la distribution d'amplitude. Il s'agit d'une mesure de la symétrie de la variation d'un profil autour de sa ligne moyenne. [4]

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

Equation II.11

II.5.2 Principaux paramètres de la rugosité

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

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

[4]

II.5.3 Paramètres liés aux motifs et à la ligne enveloppe

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

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

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

Equation II.12

$$AR = \frac{1}{n} \sum_{I=1}^n AR_I$$

Equation II.13

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

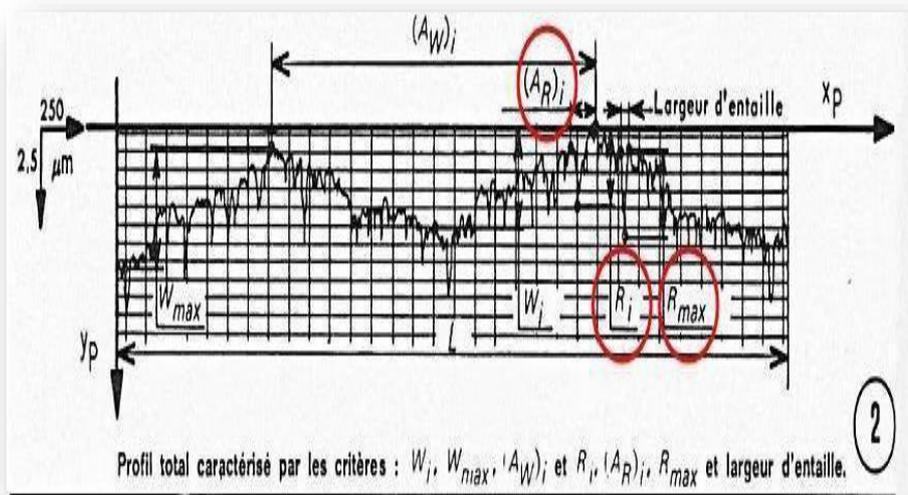


Figure II.10 : Profil total caractérisé par les critères : W_i , W_{max} , A_{W_i} et R_{max} et largeur d'entaille [4]

Pas moyen :

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

Equation II.14

Profondeur moyenne :

$$W = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m W_j$$

Equation II.15

[4]

II.5.4 Paramètres liés à la ligne moyenne

La référence pour le calcul des paramètres dans la définition ISO 4287/1, est la ligne des moindres carrés calculée sur une longueur de base, la valeur moyenne des valeurs trouvées sur cinq longueurs de base. [4]

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

II.5.4.1 Au niveau de la longueur de base

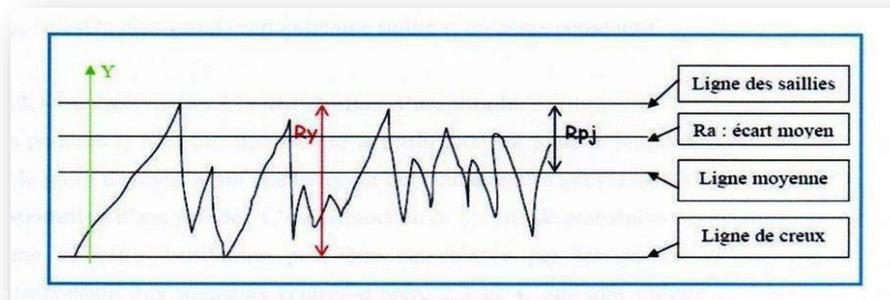


Figure II.11 : Paramètre liés a la longueur de bas [4]

Avec :

- ✓ R_{pj} : distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne
- ✓ R_{aj} : écart moyen Arithmétique du profil
- ✓ R_y : distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux
- ✓ R_p : Représente la moyenne des R_{pj}

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

Equation II.16

- ✓ R_t : c'est le plus grand des R_y (R_y étant dans la longueur de base, on choisit le plus grand.
- ✓ R_y compris dans la longueur d'évaluation). On considère que R_t est plus au moins équivalente à R_y
- ✓ R_{max} : c'est le plus grand écart entre une saillie et un creux consécutif

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

Equation II.17

[4]

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

Equation II.18

II.5.4.2 Au niveau de la longueur d'évaluation

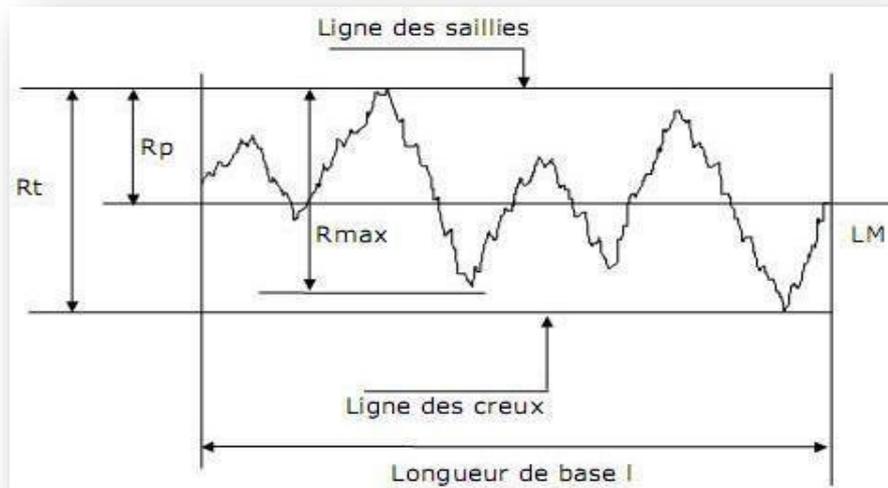


Figure II.12 : Paramètres liés à la longueur d'évaluation [4]

II.5.5 Paramètres liés à la distribution d'amplitude

Ces paramètres sont calculés soit sur le profil total sur toute la longueur d'évaluation L, soit sur le profil de rugosité sur une longueur qui peut être plus grande que la longueur de base. [4]

II.5.5.1 Distribution d'amplitude

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

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

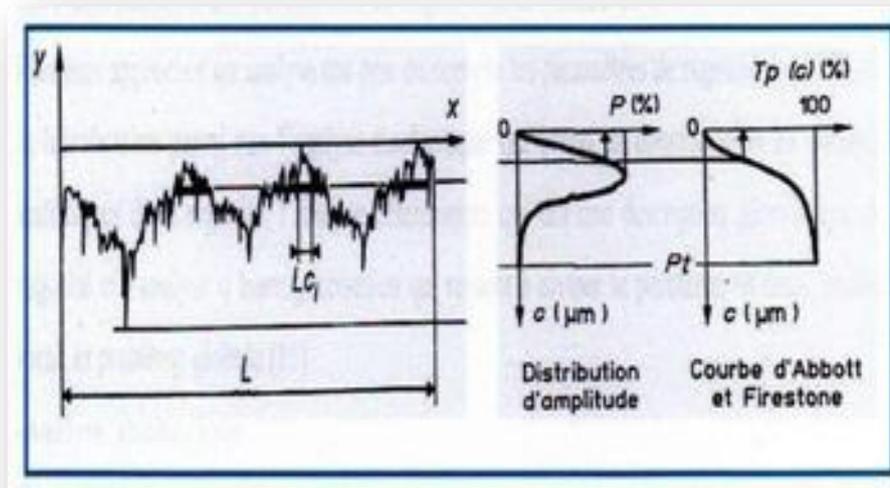


Figure II.13 : Paramètres liés à la distribution d'amplitude [4]

Avec :

- ✓ C : (nm) profondeur de coupe
- ✓ Lci : longueur de coupe élémentaire
- ✓ P : (%) densité de probabilité des points du profil Pt : profondeur totale du profil Tp (C) : taux de longueur portante (% de longueur portante après une

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

[4]

II.6 Mesure de la rugosité

Les rugosimètres sont utilisés pour déterminer de manière fiable et précise un certain nombre de paramètres de rugosité (R_a , R_z , etc.)

Dans le domaine de la mécanique l'optimisation de la rugosité permet un meilleur ancrage mécanique, notamment dans les dispositifs où le frottement est la fonction principale.

Les rugosimètres sont principalement employés pour contrôler le niveau d'usure de surfaces métalliques, l'état de surfaces usinées et le fini de surfaces peintes. Ils offrent parfois une précision de l'ordre du nanomètre.



Figure II.14 : Rugosimètre



Figure II.15 : Mesure des états de surface

II.7 Techniques d'amélioration des états de surface

II.7.1 La rectification

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

Les deux techniques principales sont la rectification plane et cylindrique.

[23]

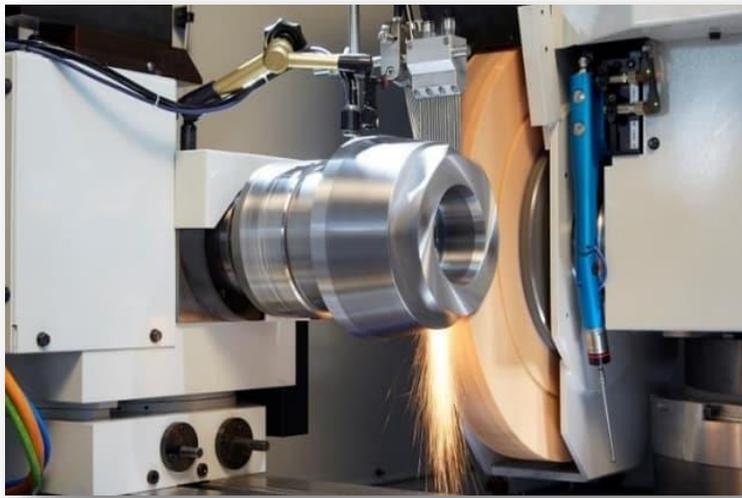


Figure II.16 : Opération de rectification [23]

II.7.1.1 Principe de la rectification

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

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

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

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

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

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

Contrairement à l'usinage traditionnel (enlèvement de copeaux par outils coupant), la rectification permet des usinages de précision dimensionnelle élevée grâce au principe de l'usinage par abrasion.

Dans la plupart des cas de rectification, les rectifieuses ont besoin d'utiliser un liquide de refroidissement et d'arrosage pour arroser la meule et les pièces afin ne pas faire des brûlures sur les pièces produites ce liquide refroidi les pièces pour ne pas avoir un mauvais état de surface.

[24]

II.7.1.2 Avantage de la rectification

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

[24]

II.7.2 Superfinition

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

Elle opère sur deux caractères :

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

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

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

La différence essentielle entre superfinition et rectification porte sur le mouvement de coupe de l'abrasif.

L'action très rapide de la meule est remplacée par celui d'une pierre abrasive à mouvement rectiligne alternatif. Ce mouvement de vibration a une fréquence d'environ 25 coups par seconde et une amplitude de 1 à 5 mm. L'abrasif travaille à faible vitesse (10 à 20 m/min, contre 3000 m/min en polissage).

[25]



Figure II.17 : Technique de superfinition pour obtenir une surface à très faible rugosité [24]

II.7.3 Polissage

C'est l'opération qui consiste à parfaire l'usinage d'une pièce de métal par polissage à l'aide de pierres abrasives. C'est une des techniques utilisées pour assurer le rodage ou la super finition d'une surface usinée.

Son but est de supprimer les traces laissées par les outils coupants sur les surfaces usinées ainsi que la fine couche (quelques microns) brûlée par un précédent usinage à la meule. Cette opération remplace le rodage naturel pratiqué, surface contre surface, au début du fonctionnement des ensembles.

Les outils actifs de polissage sont constitués par un ensemble de pierres abrasives en forme de barrettes montées sur un porte-outil.

La limite du polissage comme pour la super finition est, pour le bon fonctionnement du mécanisme, de laisser assez de micro-espace pour assurer une bonne lubrification. Une surface « idéale » comme dans le cas de cale étalon empêcherait le film d'huile d'agir, entraînant échauffement et grippage.

Un bon polissage est souvent reconnu par le trait croisé qu'il laisse visible sur la surface des pièces.

[27]

II.7.4 Rodage

Le rodage est une technique ancienne qui permet d'ajuster parfaitement deux surfaces pour qu'elles deviennent étanches.

La technique consistait en un frottement rotatif des deux pièces avec une pâte d'émeri jusqu'à ce que le contact soit parfait. La technique pour le rodage d'alésage est aussi utilisée pour obtenir des géométries et états de surface très pointue.

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

Elle nécessite souvent une rectification préalable.

[28]

II.7.5 Galetage

Le galetage consiste en un écrasement de cette surface, à froid, sous la pression de galets traités (outils ou molettes de galetage). Les outils entraînent la pièce à galeter en rotation

R_a obtenu : $0,1 \mu\text{m}$.

Intégration dans le processus : est placée suite à d'autres procédés : usinage, rectification...

Le galetage est un procédé industriel réalisé en finition et superfinition.

L'opération est réalisée avec un outil : le brunissoir à galets.

[29]



Figure II.18 : Galetage [29]

II.7.5.1 Avantages du galetage

- Amélioration de l'état de surface de la pièce usinée.
- Opération économique du fait qu'elle se fait sur pièce non traitée, et donc qu'elle économise une opération de rectification plus coûteuse.
- Opération très précise, surtout dans le cas de l'utilisation de la commande numérique.
- Augmente la résistance à la corrosion.
- Augmente la dureté superficielle.

[29]

II.7.5.2 Galetage de renforcement

Il permet d'augmenter la résistance à la fatigue, soit sur son ensemble soit sur les parties soumises à des concentrations de contraintes élevées. Cette opération favorise l'endurance de la pièce. [29]

II.7.5.3 Galetage de mise en forme

Le but est de modifier la forme initiale de la pièce, soit pour introduire des corrections volontaires destinées à un usage particulier, soit pour ramener la forme initiale dans la tolérance. [29]

II.7.5.4 Galetage de super finition

Dans tous les cas le galetage améliore l'état de surface. Il est possible d'atteindre un niveau de super finition (sans modification de forme) à l'aide d'outils dont la surface est polie ou glacée. [26]

II.8 Lubrification

La lubrification ou le graissage est un ensemble de techniques permettant de réduire le frottement, l'usure entre deux éléments en contact et en mouvement l'un par rapport à l'autre. Elle permet souvent d'évacuer une partie de l'énergie thermique engendrée par ce frottement, ainsi que d'éviter la corrosion... [30]



Figure II.19 : Lubrification [31]

II.8.1 Les rôles de la lubrification

La lubrification permet de prévenir l'adhésion du copeau sur l'outil qui risquerait d'affecter la surface usinée.

La lubrification permet de changer le coefficient de frottement entre deux éléments afin de faciliter le glissement ou le roulement entre ces éléments ainsi que d'éviter ou de minimiser l'usure et les échauffements,

Plusieurs fonctions sont réalisées grâce à la lubrification :

- Réduire l'usure des pièces,

- Absorber / atténuer les chocs,
- Réduire / contrôler la température,
- Protéger de la corrosion,
- Nettoyer / enlever les contaminants.

[30]

II.8.2 Les lubrifiantes

Les lubrifiants ont notamment pour rôle de lubrifier, réfrigérer ou les deux à la fois ; pour réduire le frottement d'une pièce par rapport à une autre ou pour l'usinage mécanique. [32]

On parle de lubrification dans le cas où le lubrifiant est liquide et de graissage dans le cas où il est compact. [30]

On lubrifie généralement les pièces de métal ou de céramique avec un corps gras, comme de l'huile ou de la graisse. Les lubrifiants sont des produits liquides, pâteux ou solides d'origine minérale (hydrocarbures pour l'essentiel), animale, végétale ou synthétique. [30]

II.9 Liquide de coupe

Un fluide d'usinage est un liquide qui, appliqué sur la partie active de l'outil, facilite l'opération d'usinage et contribue à améliorer la durée de vie de l'outil ou la productivité de l'opération. [33]



Figure II.20 : Fluide d'usinage [32]

II.9.1 Fonction assurées par les fluides d'usinage

- Lubrification
- Maintien de la température
Maintenir la pièce en cours de travail à une température stable (fonction critique lorsque les tolérances de fabrication sont réduites) car le travail des métaux génère de la chaleur à cause du frottement de l'outil sur la pièce et de l'énergie dissipée par la déformation du matériau.
- Maximiser la durée de vie de l'outil de coupe
Cela en lubrifiant l'arête de coupe et en réduisant le phénomène de copeau rapporté
- Prévenir l'usure de la machine utilisée assuré aux opérateurs de bonnes conditions de travail
- Prévenir l'usure de la machine utilisée
- Assurer aux opérateurs de bonnes conditions de travail
- Evacuation des copeaux
Le liquide de coupe permet d'évacuer les copeaux de la zone de coupe vers un dispositif de centralisation des copeaux.

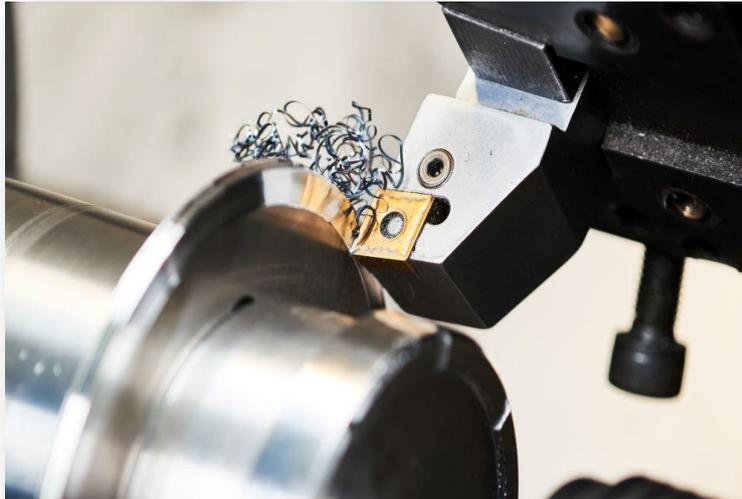


Figure II.21 : Coupeaux [35]

- Réduction de l'effort de coupe
- Faciliter la coupe
- Limiter l'usure de l'outil, la corrosion, la formation de brouillard
- Contenir le développement des microorganismes pouvant coloniser les fluides aqueux.

II.9.2 Composition des fluides d'usinage

Les fluides d'usinage sont utilisés pour de très nombreuses opérations d'usinage, ce qui explique leurs compositions très variées. [32]

II.9.2.1 Huiles entières

- Huiles minérales, additives ou non

II.9.2.2 Fluides de type émulsion

Les fluides de type émulsion contiennent en général :

- Une base type huile minérale ou alkylbenzène un émulateur
- Un agent anticorrosion
- Des additifs type extrême pression des bactéricides et/ou des fongicides des agents anti-mousses
- De l'eau
- Ces fluides sont fournis sous forme de concentrés qu'il faut diluer dans l'eau avant emploi (2 à 10 % habituellement).

II.9.2.3 Fluides de type microémulsion

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

- Une base huile minérale ou alkyl benzène
- Un émulateur anticorrosion
- Des additifs anti mousses
- Des additifs extrême-pression (non obligatoirement)
- Des bactéricides et/ou fongicides
- Un solvant
- De l'eau

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

II.9.2.4 Fluides synthétiques

II.9.3 Risques liés aux fluides d'usinage

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

Les opérations d'usinage émettent des aérosols, dont l'inhalation peut être à l'origine de diverses affections respiratoires.

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

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

[32]

II.10 Indication de rugosité

La rugosité est symbolisé par : $\sqrt{\quad}$

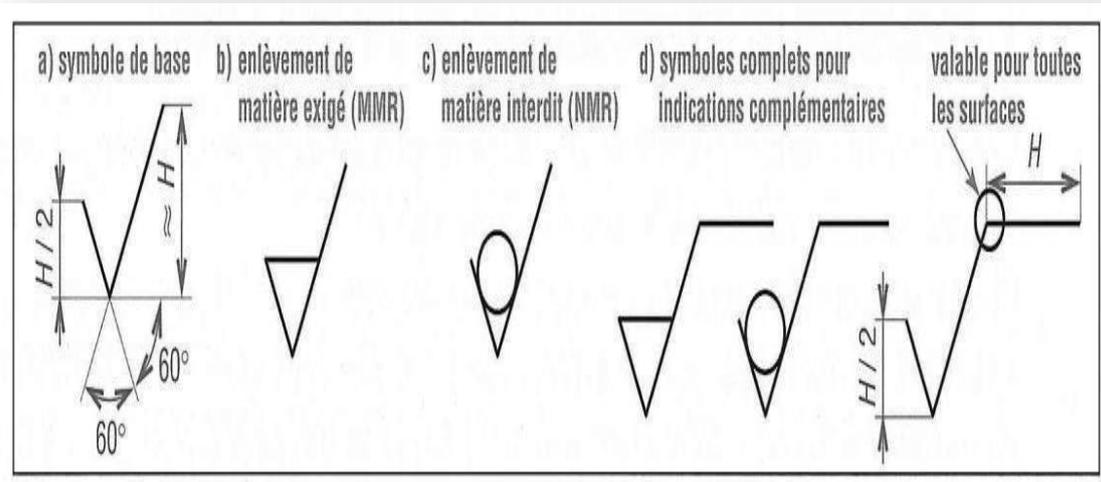


Figure II.22 : Symbole graphique de l'état de surface [4]

La notation est complétée par des informations sur les paramètres de rugosité utilisés, le procédé de fabrication (le cas échéant), etc.

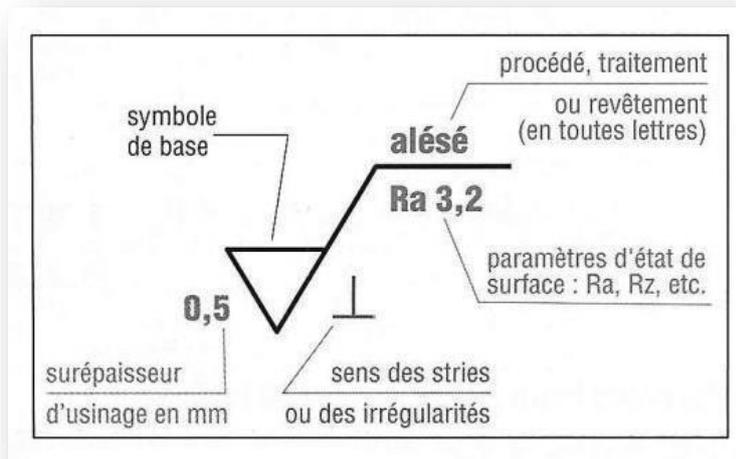


Figure II.23 : Exemple de symbolisation [4]

II.11 Conclusion

Mesurer la rugosité permet de prévoir la fonction d'une pièce dans un ensemble, sa texture et son usure. Le contrôle de la qualité ainsi peut détecter et permet de corriger tout problème pouvant survenir lors du traitement.

On a pu voir dans ce chapitre les différentes techniques d'amélioration des états de surfaces notamment la rectification, la super finition, le polissage et aussi le galetage.



CHAPITRE III :

DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS



III.1 Introduction

Au terme du travail traite dans ce mémoire concernant l'étude de l'influence de l'avance sur l'état de surface et ce par la détermination de la rugosité en tenant compte des conditions d'usinage.

Une série d'essais à été entamé dont les principaux résultats sont recueillies pour une analyse approfondie en vue d'une interprétation en rapport avec l'état de surface.

III.2 Partie expérimentale

III.2.1 Matière d'ébauche

Le matériau utilisé dans ce travail est l'acier E 24, acier non allié d'usage général (le type E est destiné pour la construction mécanique).

La désignation de ces aciers comprend la lettre indiquant le type d'usage, suivie de la valeur de la limite élastique minimale (R_e) exprimée en méga Pascal (MPa). À noter qu'il s'agit de la valeur à faible épaisseur, les résistances décroissantes avec l'épaisseur.

III.2.1.1 Désignation de l'acier E24

Tableau III.1 : Désignation de l'acier E24

AFNOR	DIN	AISI	NF EN 10 027 - 1
E 24 - 2	ST 37 - 2		S 235 JR

III.2.1.2 Composition chimique

Tableau III. 2 : Composition chimique

Carbone C (%)	Soufre S (%)	Manganèse Mn (%)	Phosphore P (%)	Azote N (%)
0.17 max	0.045 max	1.4 max	0.045 max	0.009 max

III.2.1.3 Caractéristique mécanique

Tableau III. 3 : Caractéristique mécanique

R (MPa)	R_e (MPa)	A (%)	Dureté HB
340 - 510	$\geq 175 - 235$	17 - 26	

III.2.1.4 Propriétés

- L'acier E 24 est un acier non allié d'usage général, non destiné aux traitements thermiques.
- Pièces mécaniques peu sollicitées et ne nécessitant pas de ténacité spéciale.
- Pas de caractéristiques mécaniques garanties

III.2.1.5 Domaines d'application

- Eléments de fixation, axes, arbres de transmission, construction métallique....
- Eléments mécano - soudés, bâtis de machine, pièces diverses ne nécessitant pas de caractéristiques particulières
- Bonne Soudabilité

III.2.2 Machine

L'usinage a été réalisé au département génie mécanique, université Badji Mokhtar Annaba.

On a utilisé un tour universel semi-automatique modèle AI616 fabriqué en URSS



Figure III.1 : Tour universel

III.2.2.1 Caractéristiques techniques

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

III.2.3 Choix de l'outil

L'outil utilisé est un outil coudé à 45° à chariotage et dressage



Figure III.2 : Outil coudé à 45° à chariotage et à dressage

III.2.4 Préparation des paliers

La préparation des paliers a été réalisée en plusieurs étapes à savoir :

1. Dressage des bouts Mise à la cote
2. Centrage
3. Chariotage

L'éprouvette est constituée de six paliers de diamètre de 20.22 mm, dont les trois premières parties sont usinés à sec, tandis que les trois autres sont lubrifiés.

Les régimes de coupe ont été choisis en fonction de la matière, de l'outil de coupe utilisé et le régime imposé lors la fabrication de cette pièce.

Pour les deux cas d'usinage (à savoir usinage à sec et lubrifié) nous avons opté pour une vitesse de coupe V_c qui est égale à 280 m/min et une profondeur de passe de 0.75 mm/tr, nous avons fait varier l'avance pour pouvoir étudier l'influence de la variation de cette dernière sur la rugosité de surface.

Dans cette étude, deux essais ont été réalisés, l'avance pour le première essai est égale à (0.5 ; 0.75 ; 1), alors que pour le deuxième essai elle est prise égale à (1.5 ; 1.75 ; 2).

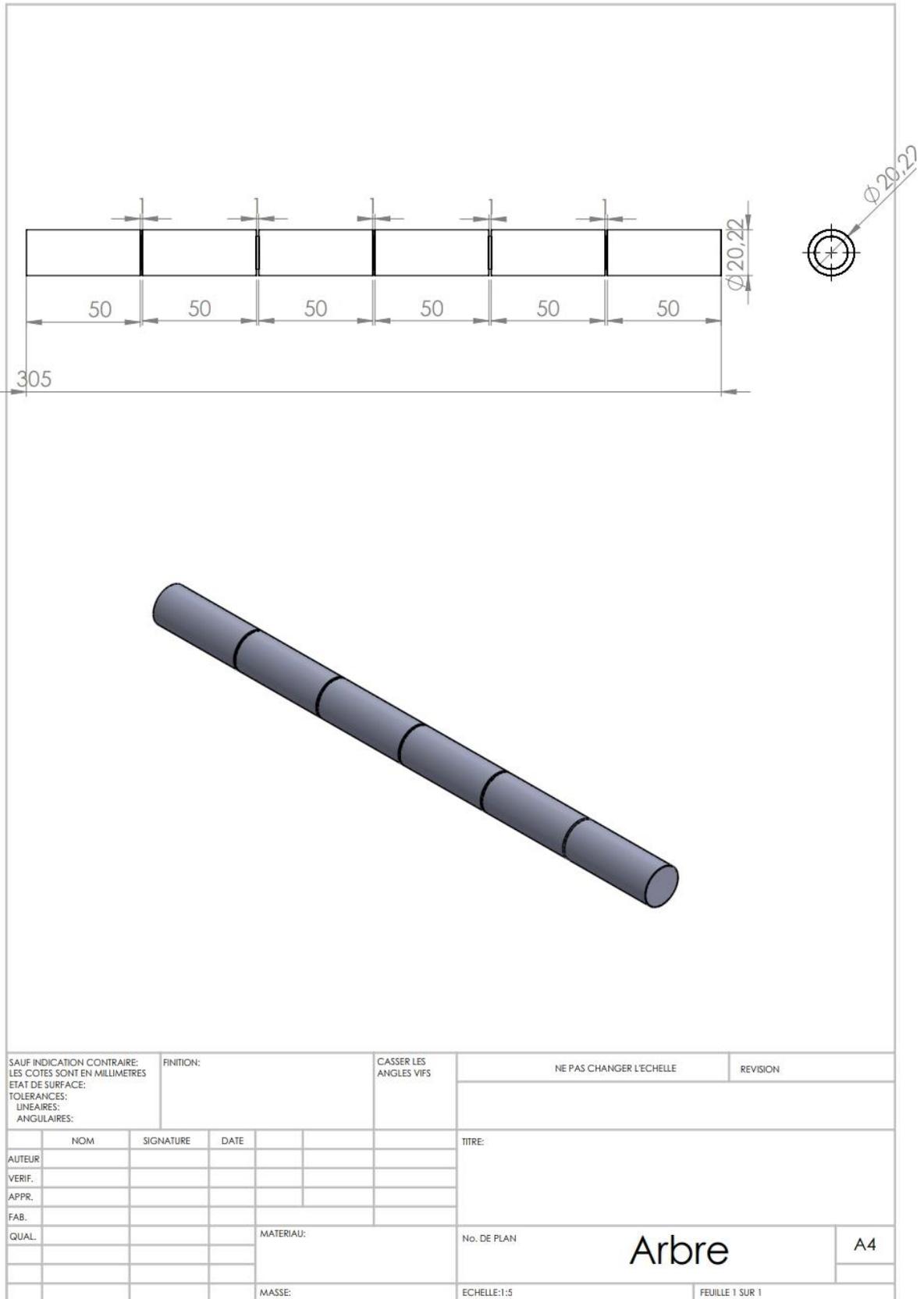


Figure III.3 : Dessin de définition de la pièce



Figure III.4 : Epreuve d'essai en acier E 24

III.2.5 Instrument de mesure

Pour la mesure des critères de rugosité Ra dans notre cas, nous avons utilisé un rugosimètre TR220.



Figure III.5 : Rugosimètre

Le TR220 est le rugosimètre approprié aux mesures les plus exigeantes en raison de sa grande Précision et de ses très nombreuses fonctions.

Pendant la procédure de mesure le capteur se déplace linéairement sur la longueur mesurée. La sonde se déplace en conséquence au profil sur la surface.

Ces mouvements sont convertis en signaux électriques qui sont amplifiés, filtrés et convertis en signaux numériques par un convertisseur d'A/D.

Ces signaux sont alors raffinés dans le processeur central comme teneurs en Ra et en Rz (ou Rq Rt métrique) et sont affichés sur l'écran.

III.2.5.1 Caractéristiques

- Menu Facile d'utilisation
- Affichage de 19 paramètres de rugosité (TR220) Ra, Rz, Ry,Rq, Rt, Rp, Rmax, Rm, R3z, S, Sm, Sk, tp...
- Méthodes de filtrage de vague : RC, PC - RC, GAUSS, DP
- Longueur d'onde de coupure : 0,25 millimètres/0,8 millimètres/2,5 millimètres
- Visualisation de la rugosité et la courbe matérielle sur l'affichage-écran
- Montre le positionnement de sonde
- Puce de DSP pour l'informatique et le calcul (pour la vitesse informatique élevée)
- Diverses sondes pour des mesures dans les forages, les ouvertures et les cannelures
- Interface RS-232
- Langues sélectionnables : L'anglais, Allemand, français, italien, espagnol et néerlandais
- Course : 17.5 mm.
- Vitesse : 0.5 mm/s.
- Filtre digital : RC, PC-RC, Gauss, D-P.
- Capteur : Diamant, rayon 5 µm (pointe).
- Température d'utilisation : 5 à 40°C.
- Alimentation : Batterie lithium, 1000 mAh.
- Dimensions : 141 x 56 x 48 mm.
- Poids : 440 g

III.2.5.2 Application

Détecte la rugosité des surfaces dures aussi bien qu'à l'intérieur des trous, des ouvertures et des cannelures

Par exemple à : Laboratoires, salles de mesure, ateliers, équipements d'ingénierie, et beaucoup plus.

III.3 Discussion et interprétation des résultats

III.3.1 Résultats obtenus

III.3.1.1 Rugosité de surface déterminée lors d'un usinage à sec

Les résultats concernant la rugosité déterminée à partir d'un usinage à sec se résument comme suit :

Tableau III.4 : Valeurs de rugosité relevée lors d'un usinage à sec

	Usinage à sec						Unité
	1 ^{er} essai			2 ^{ème} essai			
Avance a	0.5	0.75	1	1.5	1.75	2	mm
Vitesse de coupe Vc	280						m/min
Profondeur de passe f	0.75						mm/tr
Rugosité Ra	3.062	3.976	3.740	1.75	3.574	2.389	µm
	2.500	2.959	3.844	3.715	2.980	2.840	
	2.622	3.133	3.048	3.450	4.260	3.550	
Rugosité moyenne Ra	2.728	3.356	3.544	2.971	3.604	2.921	µm

III.3.1.2 Rugosité de surface déterminée lors d'un usinage avec lubrification

Les résultats concernant la détermination de la rugosité obtenus par un usinage avec lubrification se répartissent comme suit :

Tableau III.5 : Valeurs de la rugosité obtenue lors d'un usinage avec lubrification

	Usinage lubrifié						Unité
	1 ^{er} essai			2 ^{ème} essai			
Avance a	0.5	0.75	1	1.5	1.75	2	mm
Vitesse de coupe Vc	280						m/min
Profondeur de passe f	0.75						mm/tr
Rugosité Ra	3.675	3.838	2.799	3.868	3.260	3.656	µm
	3.130	3.040	2.392	3.655	3.790	2.646	
	2.580	3.892	2.422	3.563	3.483	2.478	
Rugosité moyenne Ra	3.128	3.590	2.537	3.696	3.511	2.296	µm

III.3.2 Interprétation des résultats

III.3.2.1 Influence de l'avance sur la rugosité de surface lors d'un usinage à sec

Le graphe suivant illustre les valeurs de la rugosité déterminé lors d'un usinage à sec :

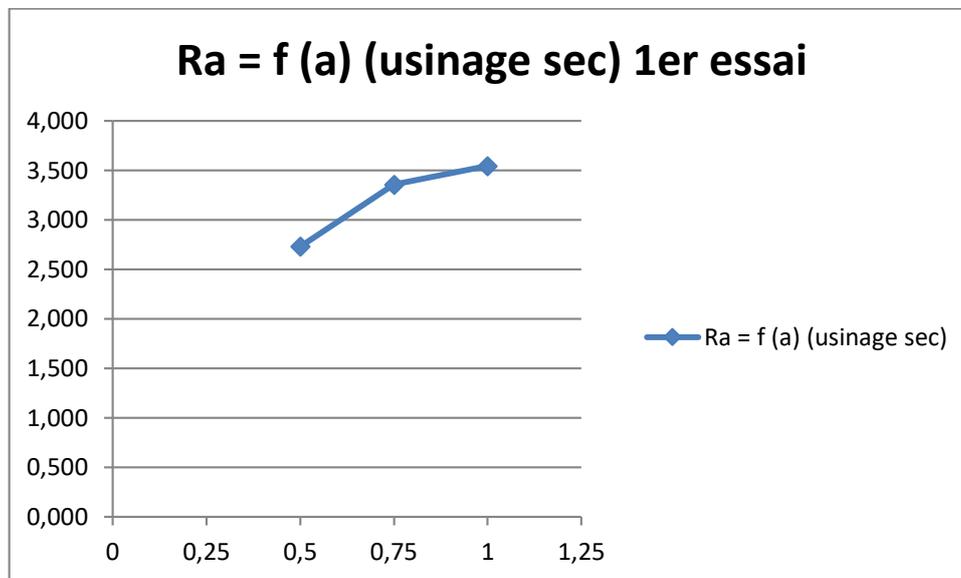


Figure III.6 : Influence de l'avance sur la rugosité de surface lors d'un usinage à sec (1^{er} essai)

D'après le graphe variation de la rugosité en fonction de l'avance lors d'un usinage à sec on constate une rugosité est égale 3.544 μm pour une avance de 1 mm, tandis que pour une avance de 0.5 mm les résultats obtenus sont plus significatifs avec une rugosité de 2.728 μm ; ce qui confirme l'absence du lubrifiant et les conditions de coupe

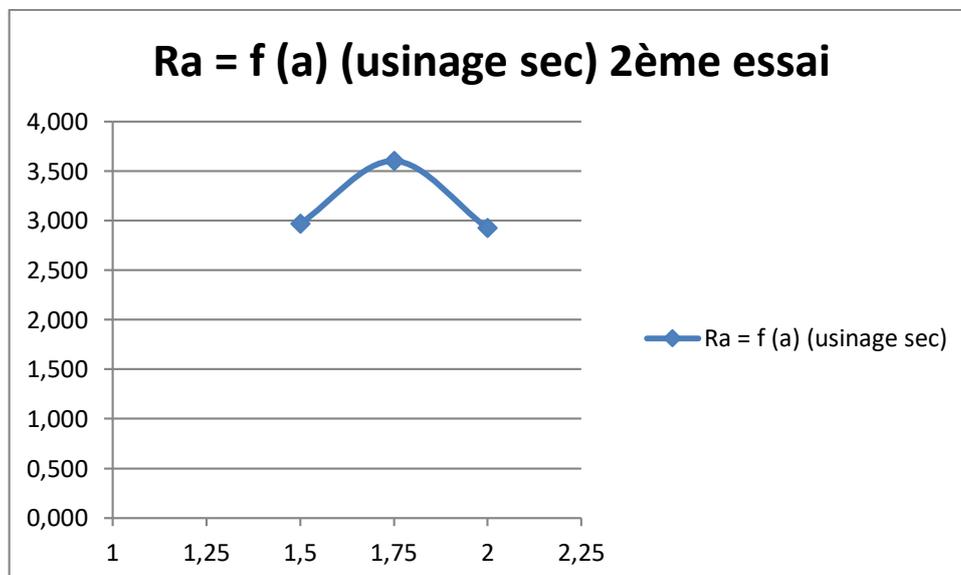


Figure III.7 : Influence de l'avance sur la rugosité de surface lors d'un usinage à sec (2^{ème} essai)

Concernant le deuxième essai, la rugosité obtenue pour une avance de 1.5 mm lors d'un essai non lubrifié est de 2.971 μm , cela annule l'effet direct de l'avance.

Ce qui veut dire que la rugosité et l'avance sont proportionnelles.

De ce fait, la valeur de la rugosité Ra qui est de 3.604 μm obtenue pour une avance de 1.75 mm doit être exclue afin de vérifier la relation de proportionnalité entre ces deux paramètres (la rugosité et l'avance).

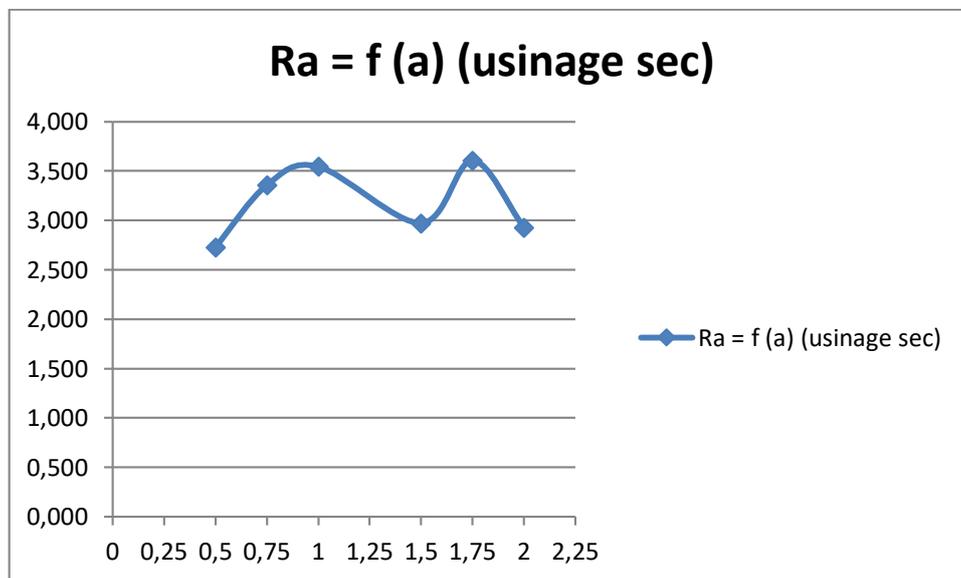


Figure III. 8 : Influence de l'avance sur la rugosité de surface lors d'un usinage à sec

III.3.2.2 Influence de l'avance sur la rugosité de surface lors d'un usinage avec lubrification

Graphes des valeurs de la rugosité obtenues lors d'un usinage avec lubrification :

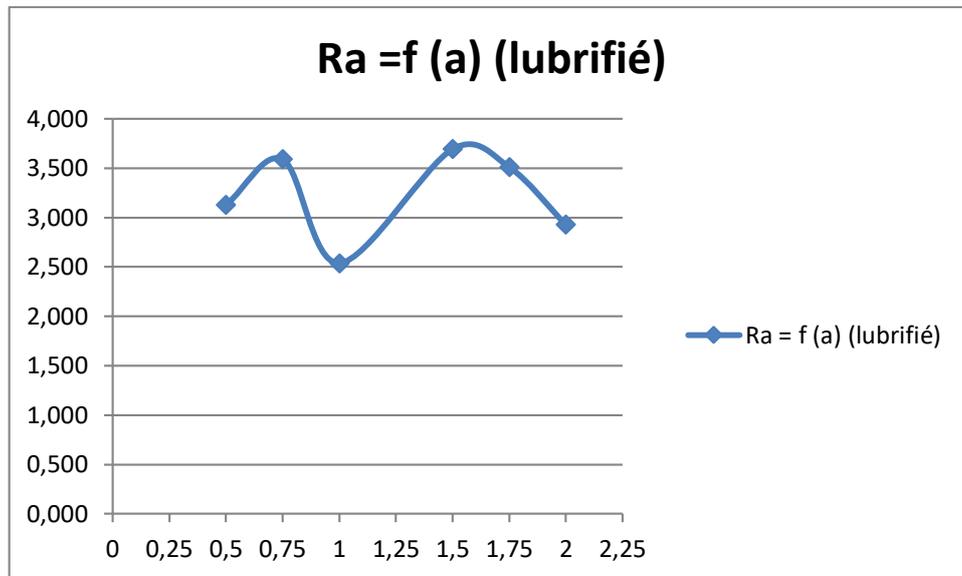


Figure III.9 : Influence de l'avance sur la rugosité de surface lors d'un usinage avec lubrification

Dans le cas d'un usinage avec lubrification la rugosité est meilleure pour les avances suivantes (0.5 ; 1 ; 1.75 et 2) mm , ce qui dénote que le lubrifiant améliore nettement l'état de surface au meme titre que l'augmentation de vitesse ; la vitesse augmente la rugosité diminue

III.3.2.3 Valeur de la rugosité de surface

Les résultats des valeurs de la rugosité sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.6 : Valeurs de rugosité relevées

	Usinage à sec						Usinage lubrifié						Unité
	1 ^{er} essai			2 ^{ème} essai			1 ^{er} essai			2 ^{ème} essai			
Avance a	0.5	0.7	1	1.5	1.7	2	0.5	0.7	1	1.5	1.7	2	mm
Vitesse de coupe Vc	280												m/min
Profondeur de passe f	0.75												mm/tr
Rugosité moyenne Ra	2.7	3.3	3.5	2.9	3.6	2.9	3.1	3.5	2.5	3.6	3.5	2.2	μm
	28	56	44	71	04	21	28	90	37	96	11	96	

III.3.2.4 Influence de l'avance sur la rugosité de surface

Le graphe ci-dessous montre l'influence de l'avance sur la variation de la rugosité de surface

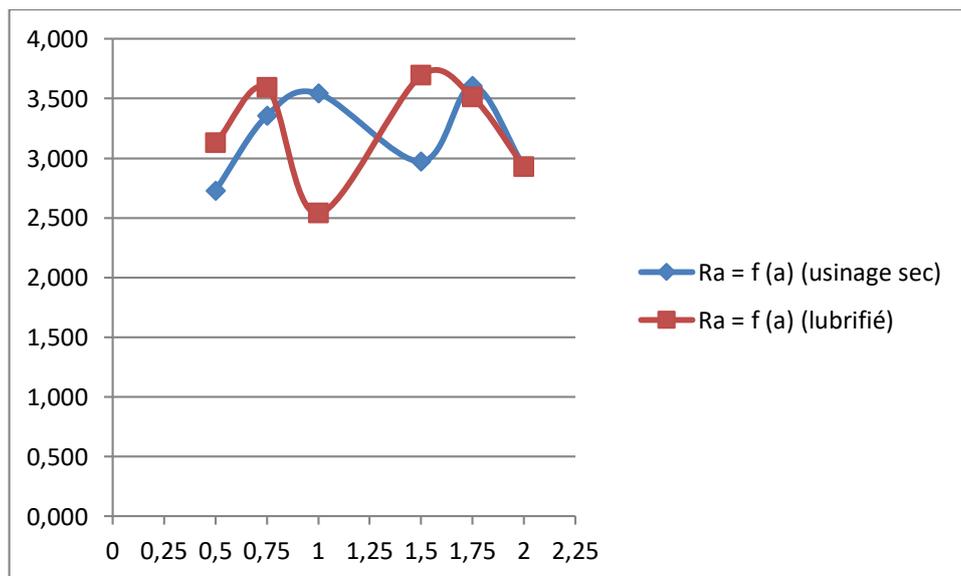


Figure III.10 : Influence de l'avance sur la rugosité de surface

Le lubrifiant assure un film entre l'outil et la pièce en diminuant le frottement et augmentant la vitesse ce qui implique que la rugosité diminue d'où elle est meilleur.

III.4 Rugosité vue en 3 D

III.4.1 Aperçu

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- motioné sur une plateforme en granit.

Les capteurs de lumière blanche chromatique combinent 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 25 mm.

Le système peut numériser une zone maximale de 150 mm x 150 millimètres.



Figure III.11 : Cyber SCAN CT 100

III.4.2 Applications

Les applications du cyber SCAN CT 100 sont :

- L'analyse et la qualité de contrôle des processus d'impression, tels que les films épais ;
- Mesure sur une variété de matériaux de substrat ;
- Mesure de volume de dépôts de pâte, films époxy, points ou autres éléments imprimés et distribués ;
- Géométrie et mesure de position de hauts objets profilés comme des bosses de soudure, des microlentilles et dispositifs MEMS ;
- ainsi que la planéité et l'analyse de coplanarité ;
- Produits imprimés, systèmes ou dispositifs ;
- Emballage de l'appareil ;
- Circuits imprimés ;

- MEMS ;
- Éléments de pile à combustible Matériaux ou revêtements souples et transparents ;
- Cellules solaires ;
- Équipement médical.

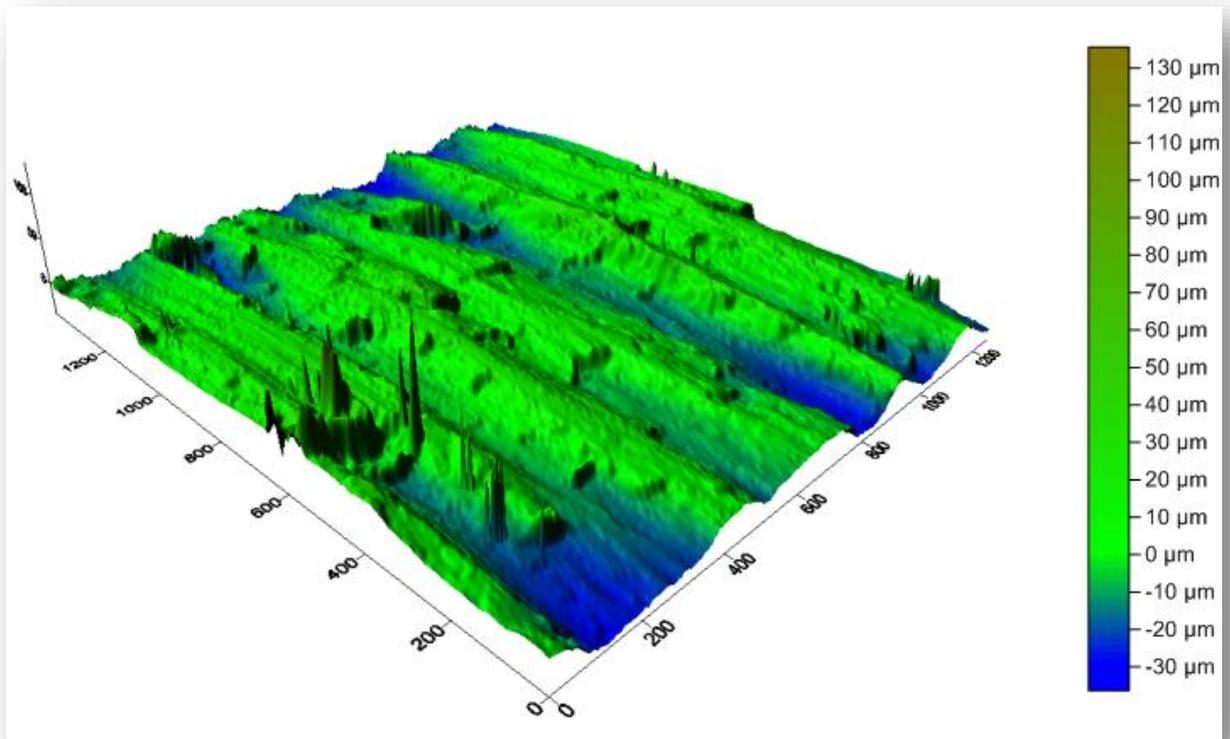


Figure III.12 : Rugosité de surface vue en 3 D lors d'un usinage à sec (1)

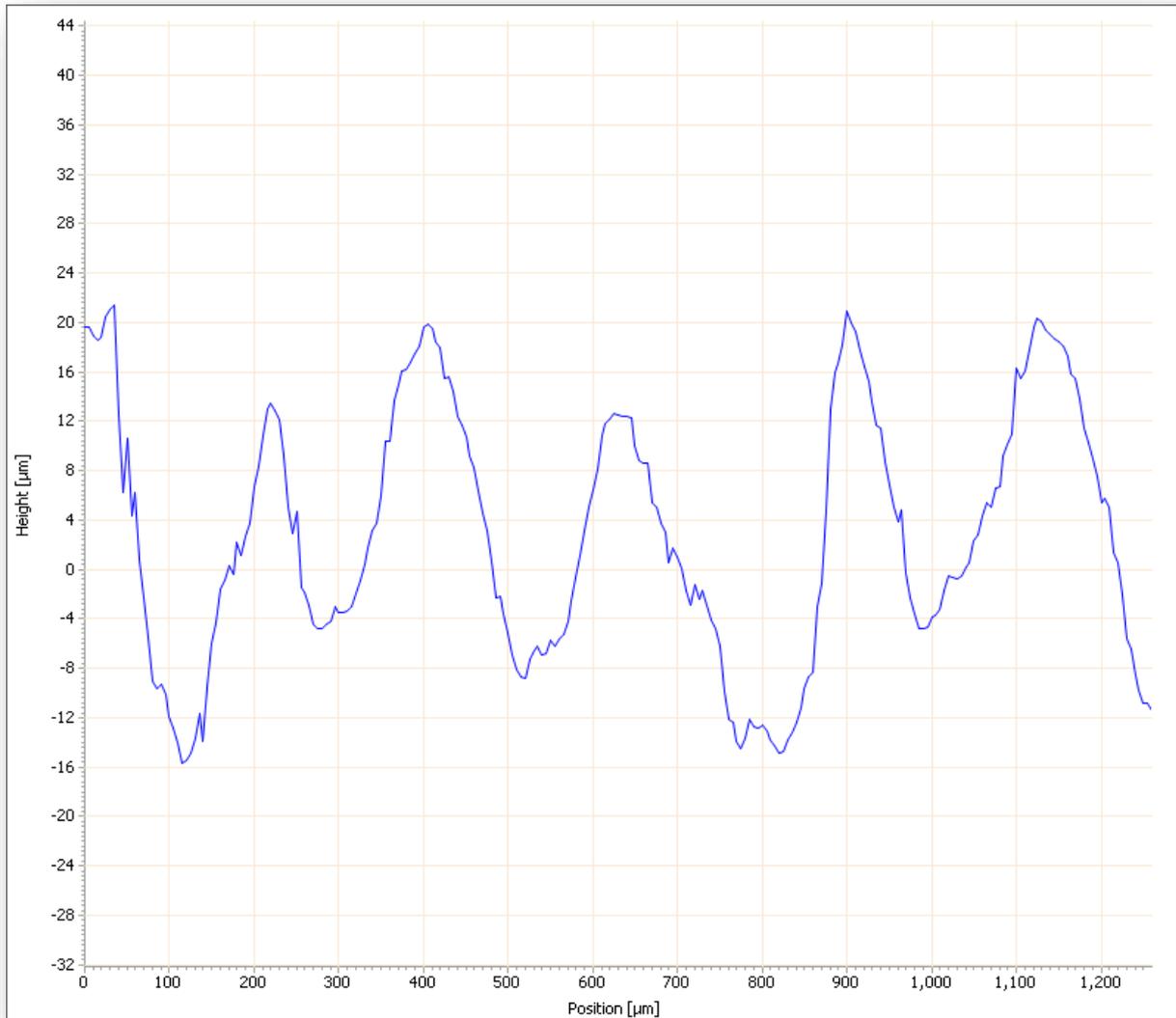


Figure III.13 : Profilographe en perspective de la surface usinée à sec (1)

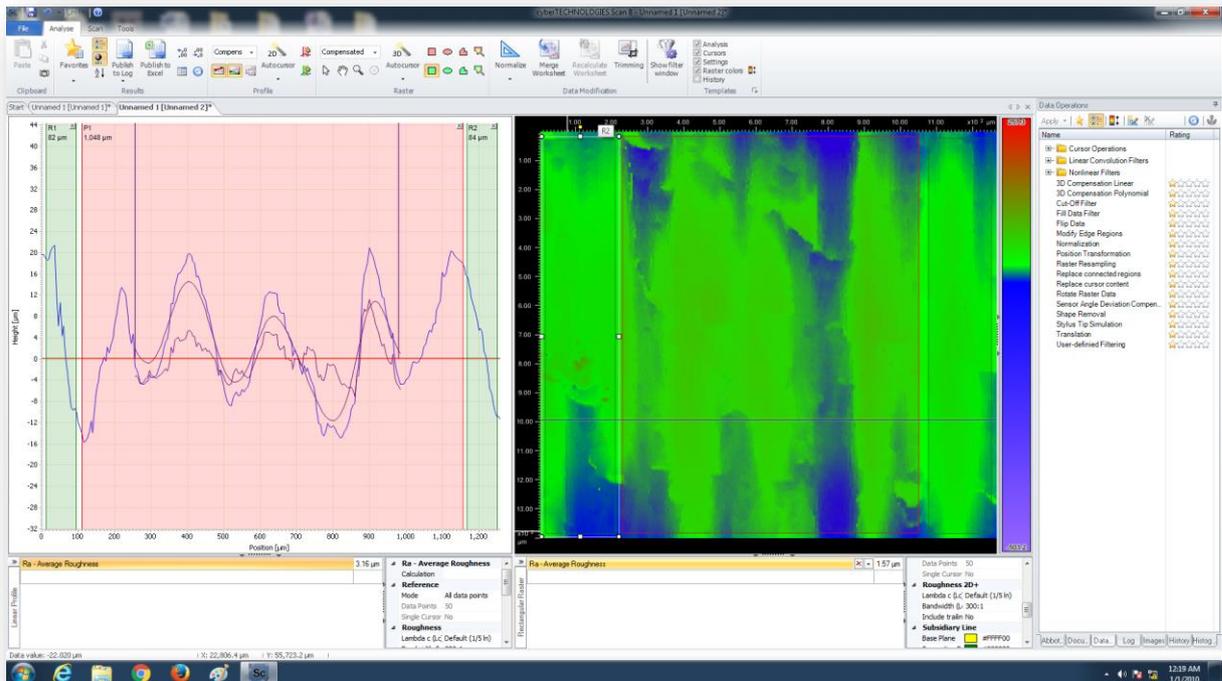


Figure III.14 : Profilgraphe en perspective de la surface usinée à sec (1)

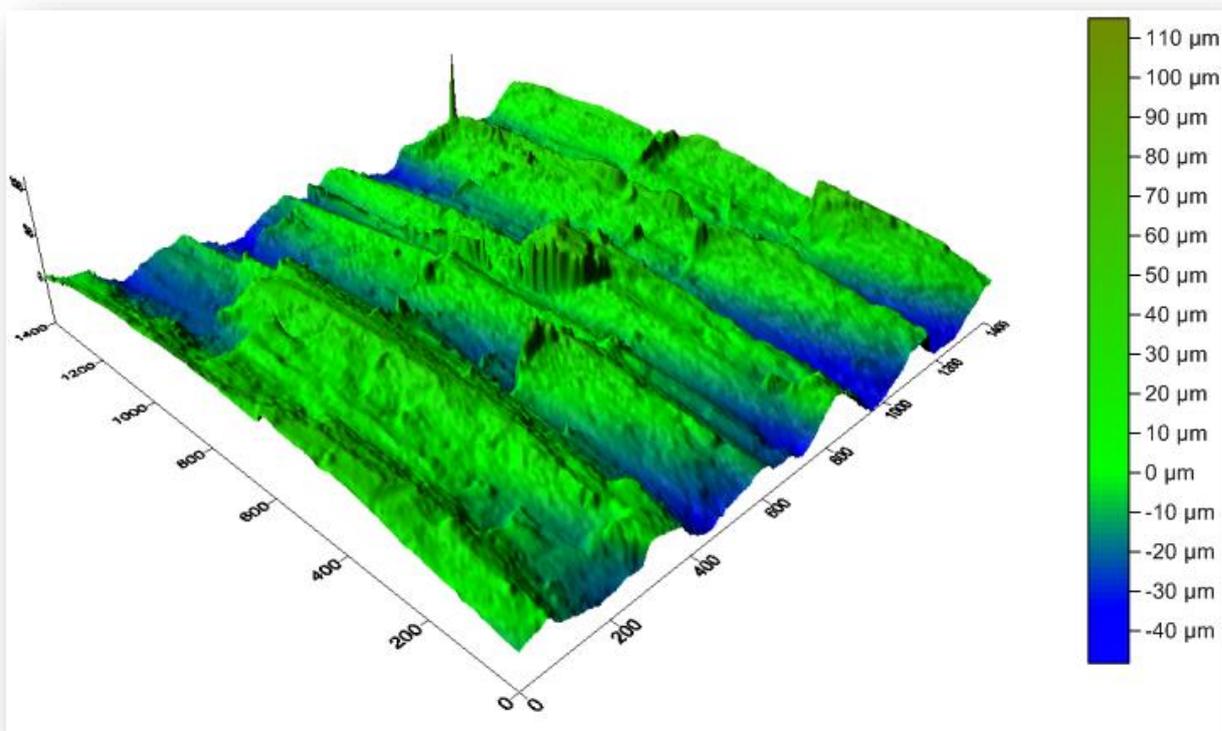


Figure III.15 : Rugosité de surface vue en 3 D lors d'un usinage à sec (2)

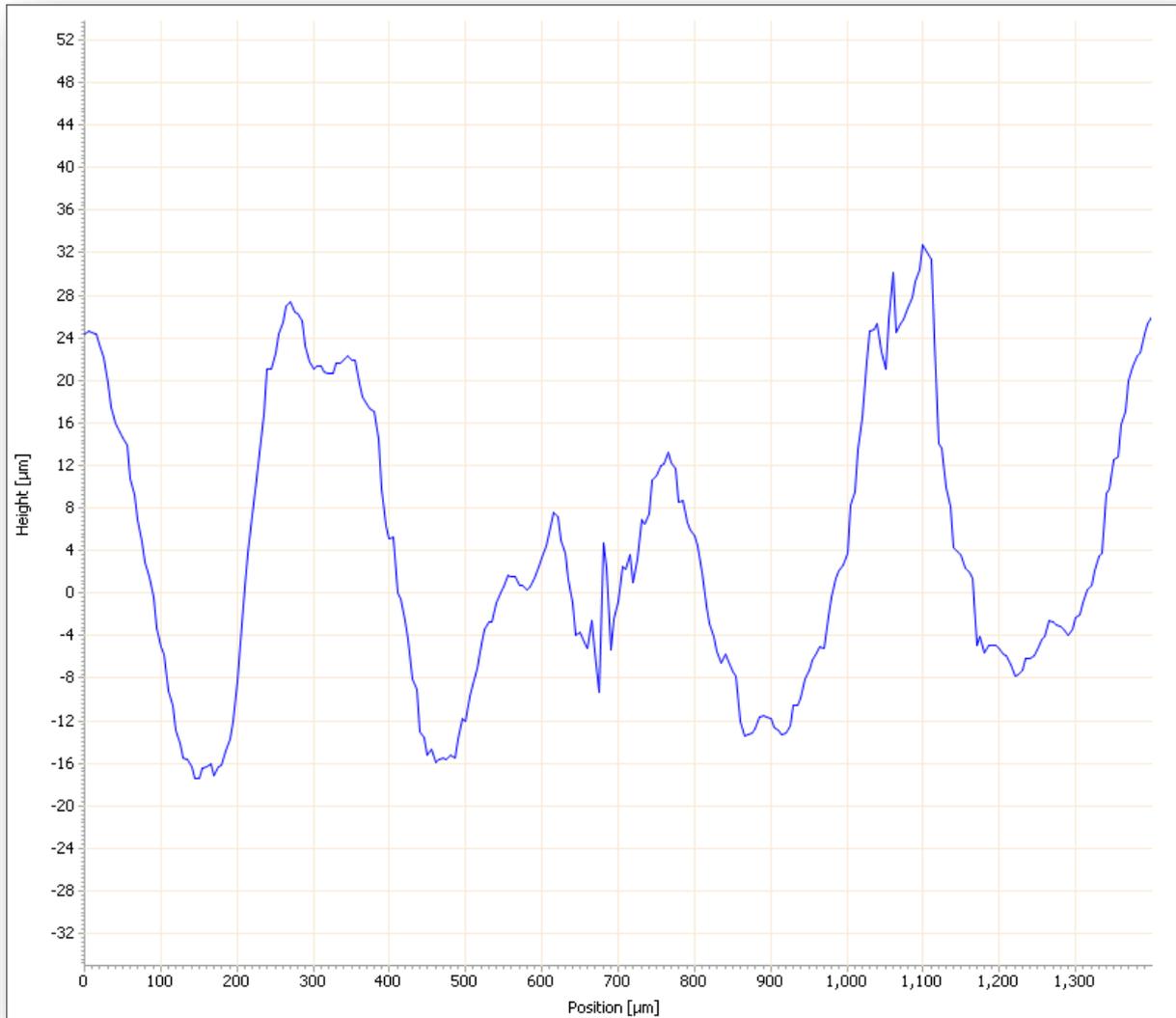


Figure III.16 : Profilographe en perspective de la surface usinée à sec (2)

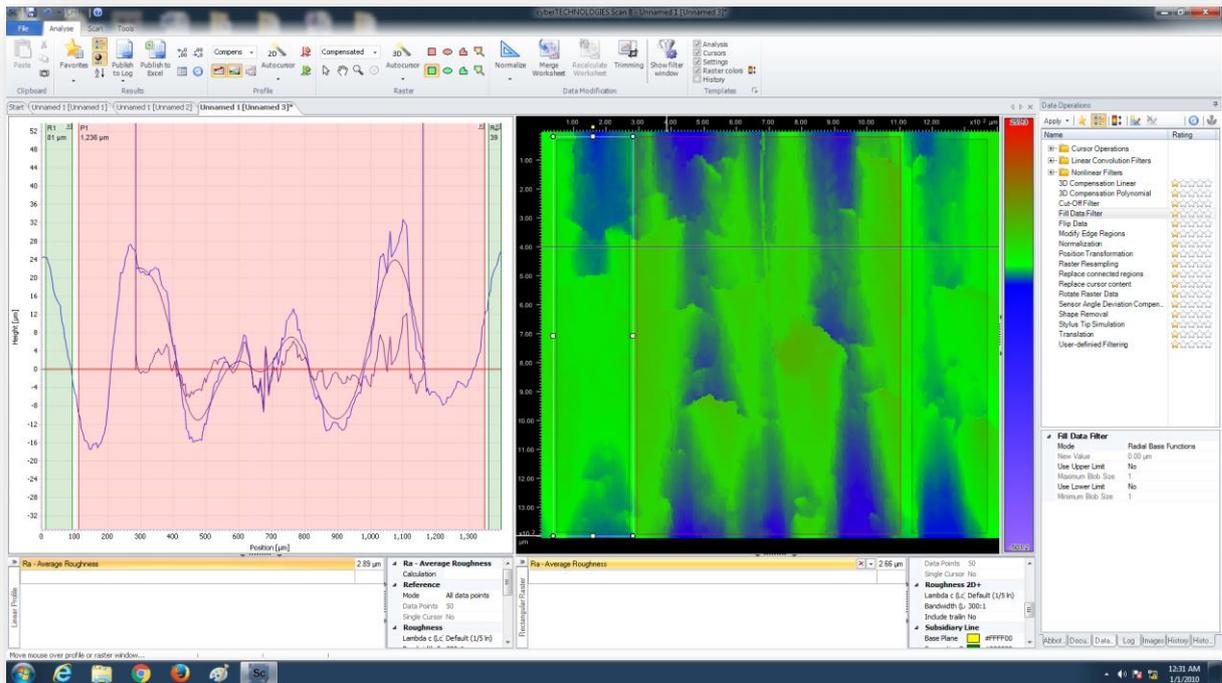


Figure III.17 : Profilgraphe en perspective de la surface usinée à sec (2)

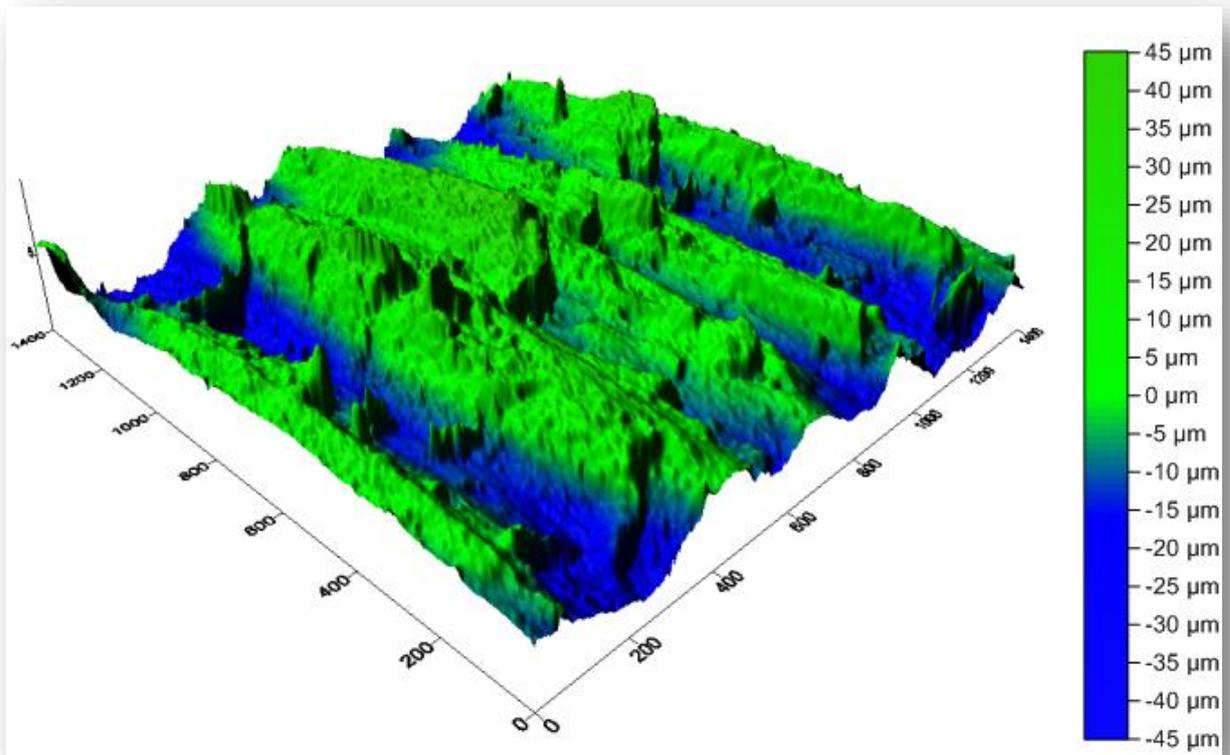


Figure III.18 : Rugosité de surface vue en 3D lors d'un usinage à sec (3)

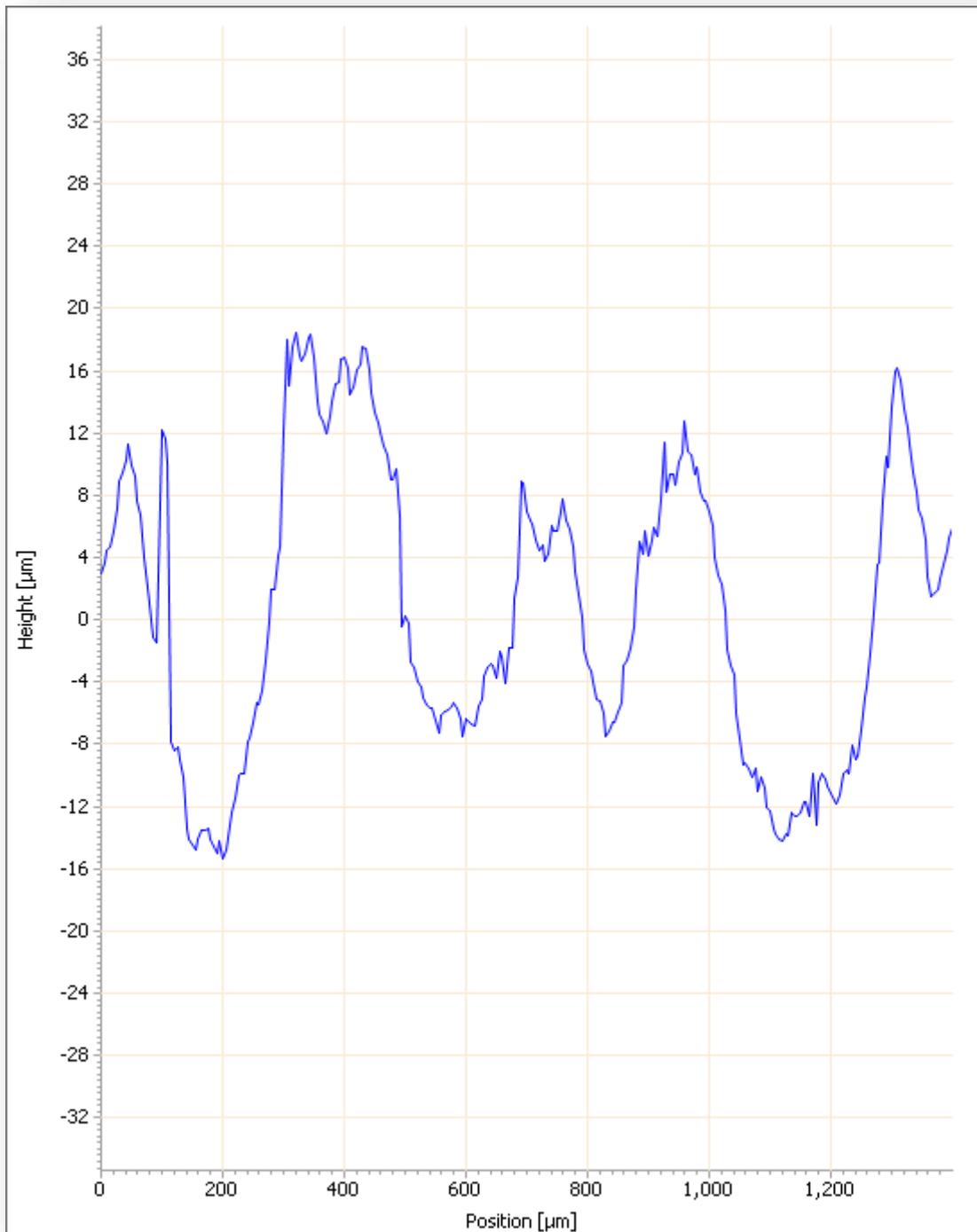


Figure III.1911 : Profilographe en perspective de la surface usinée à sec (3)

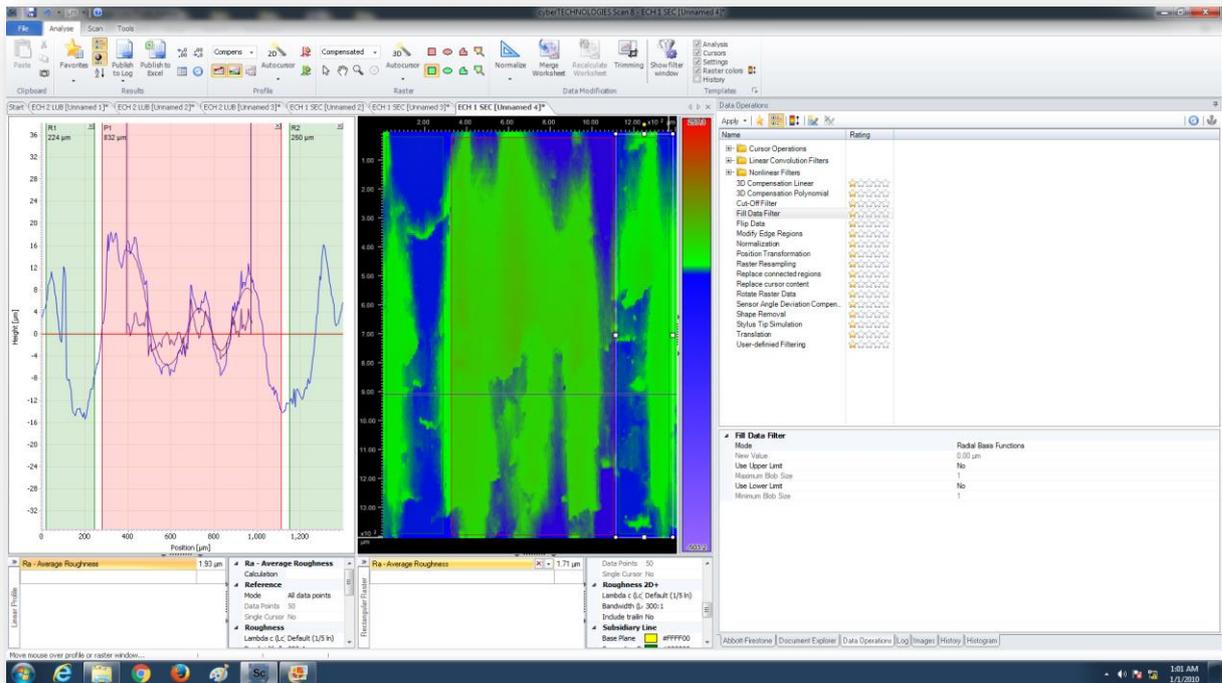


Figure III.20 : Profilographe en perspective de la surface usinée à sec (3)

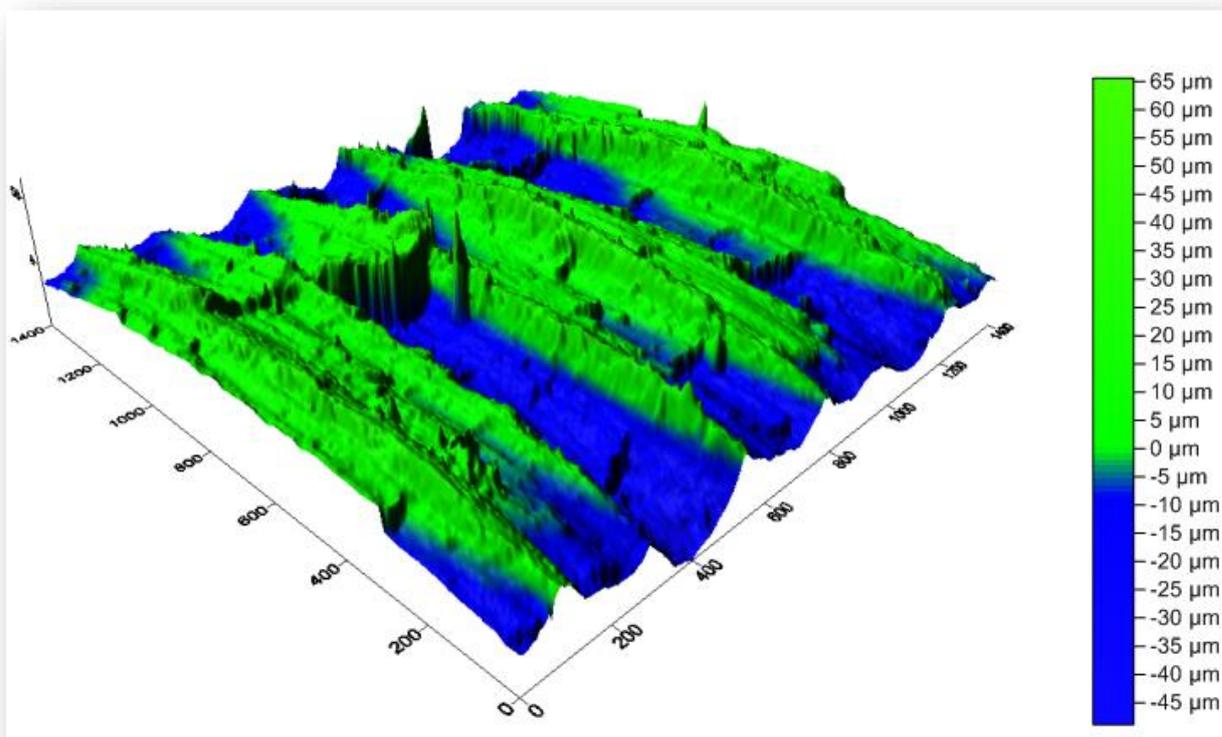


Figure III.21 : Rugosité de surface vue en 3D lors d'un usinage avec lubrification (1)

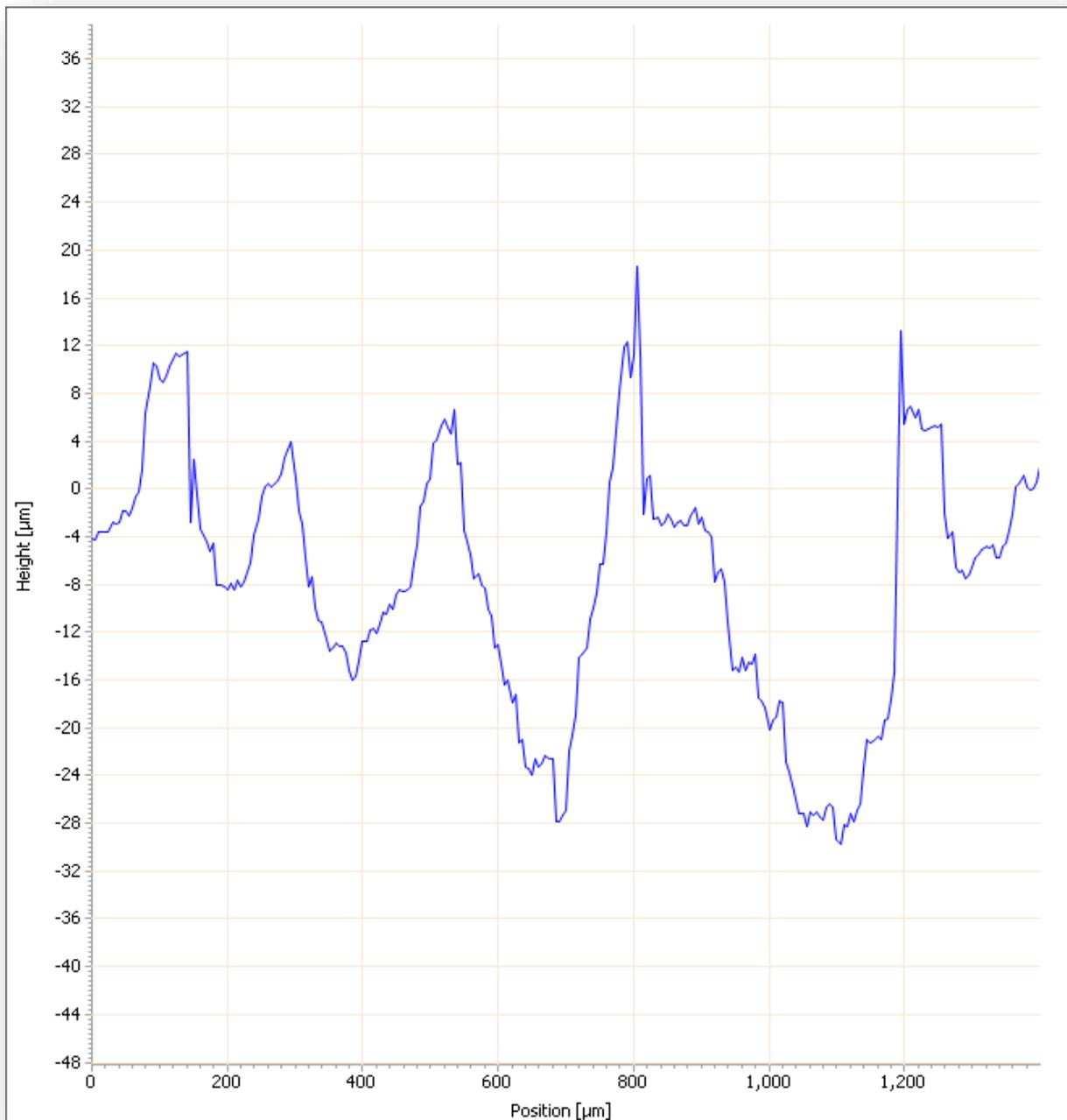


Figure III.22 : Profilographe en perspective de la surface usinée avec lubrification (1)

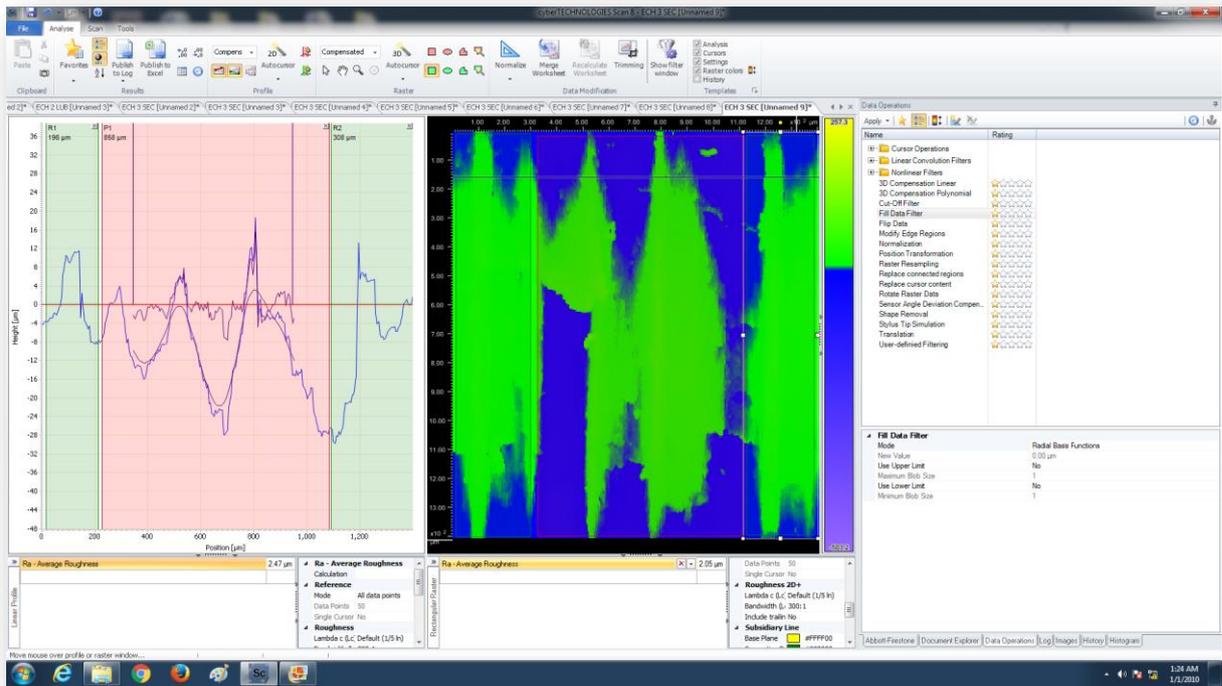


Figure III.2312 : Profilographe en perspective de la surface usinée avec lubrification (1)

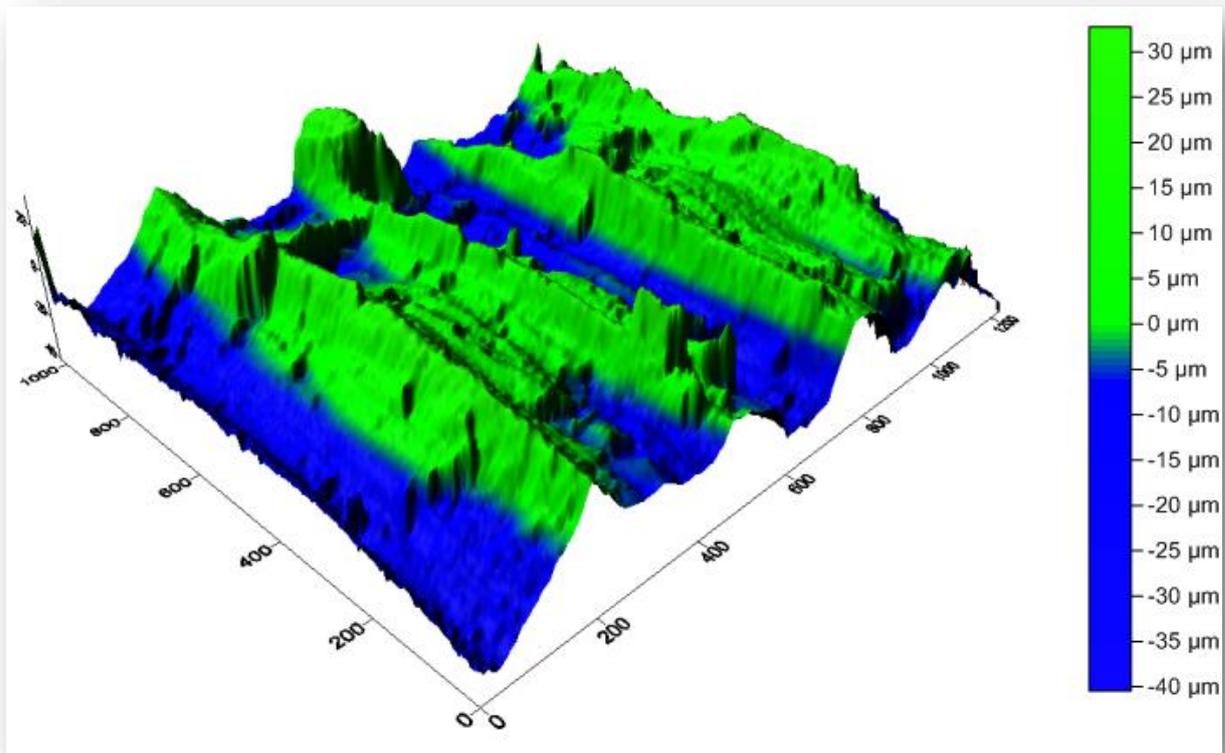


Figure III.2413 : Rugosité de surface vue en 3D lors d'un usinage avec lubrification (2)

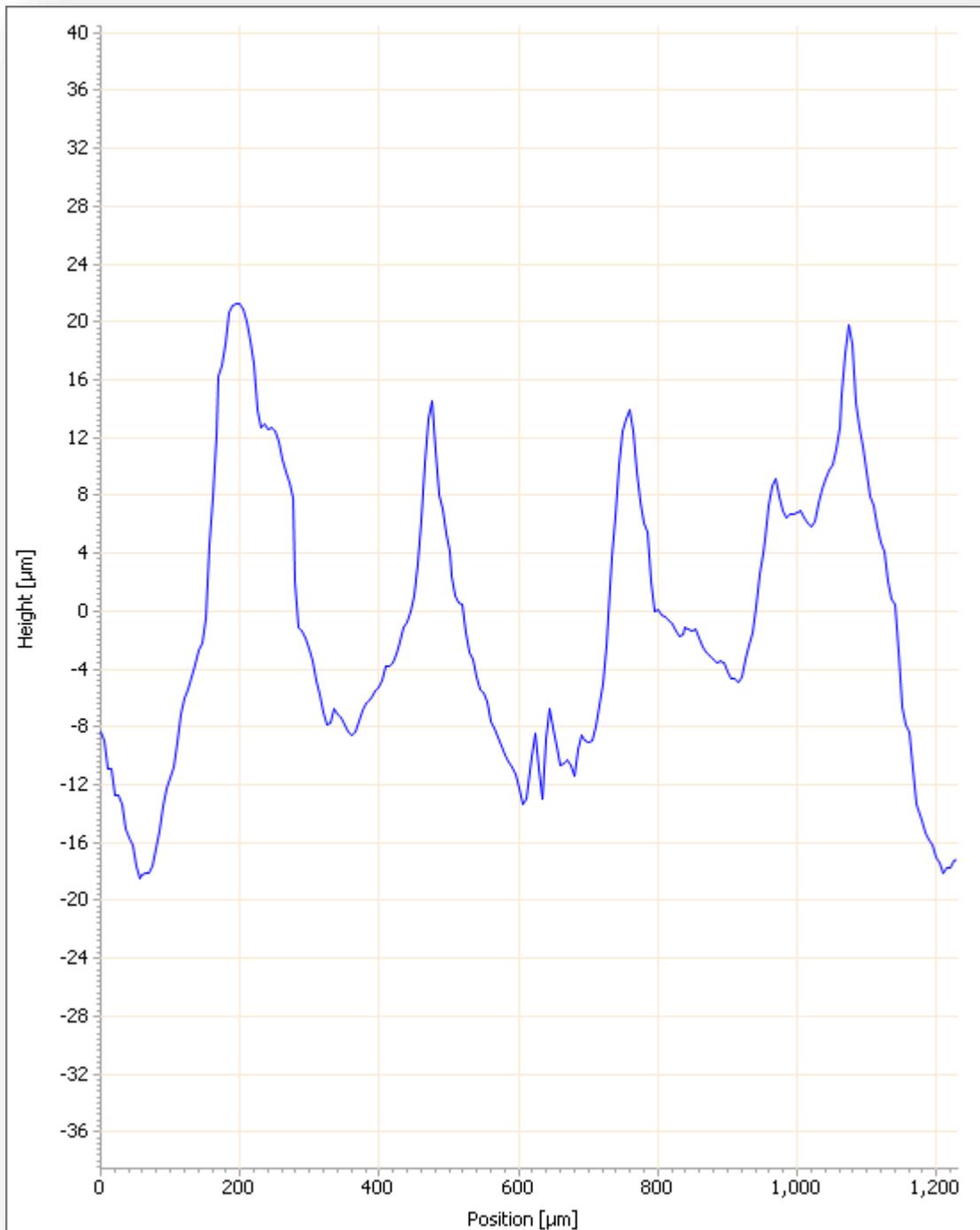


Figure III.25 : Profilographe en perspective de la surface usinée avec lubrification (2)

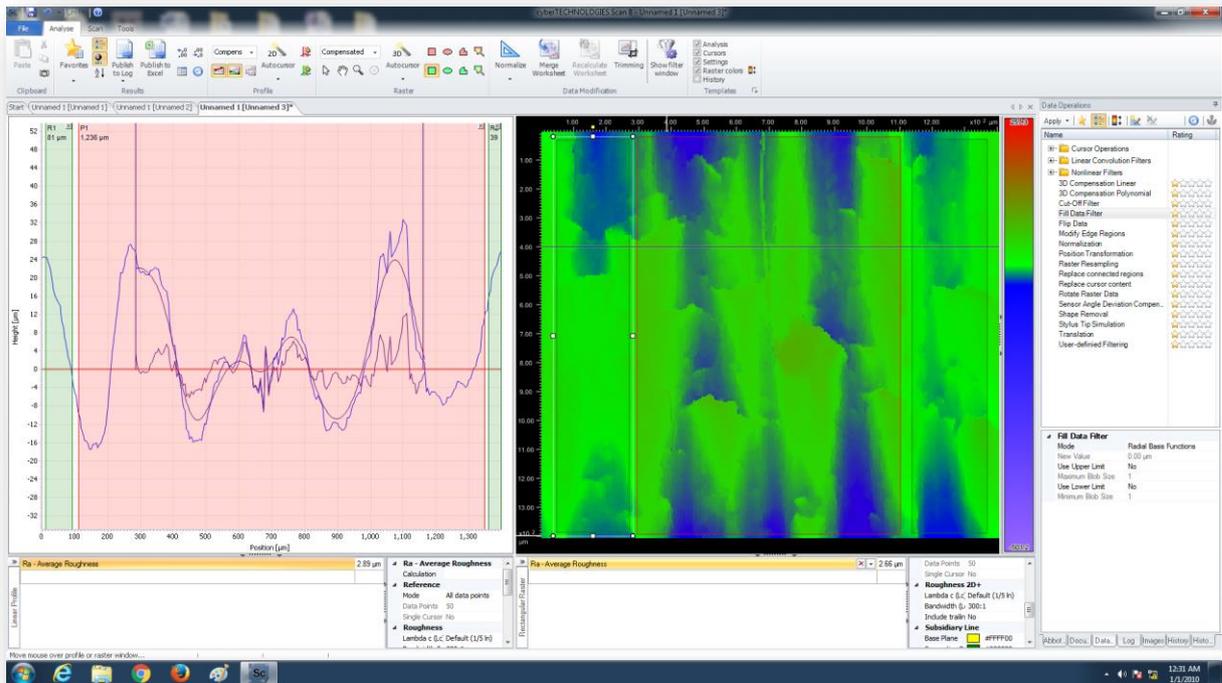


Figure III.26 : Profilgraphe en perspective de la surface usinée avec lubrification (2)

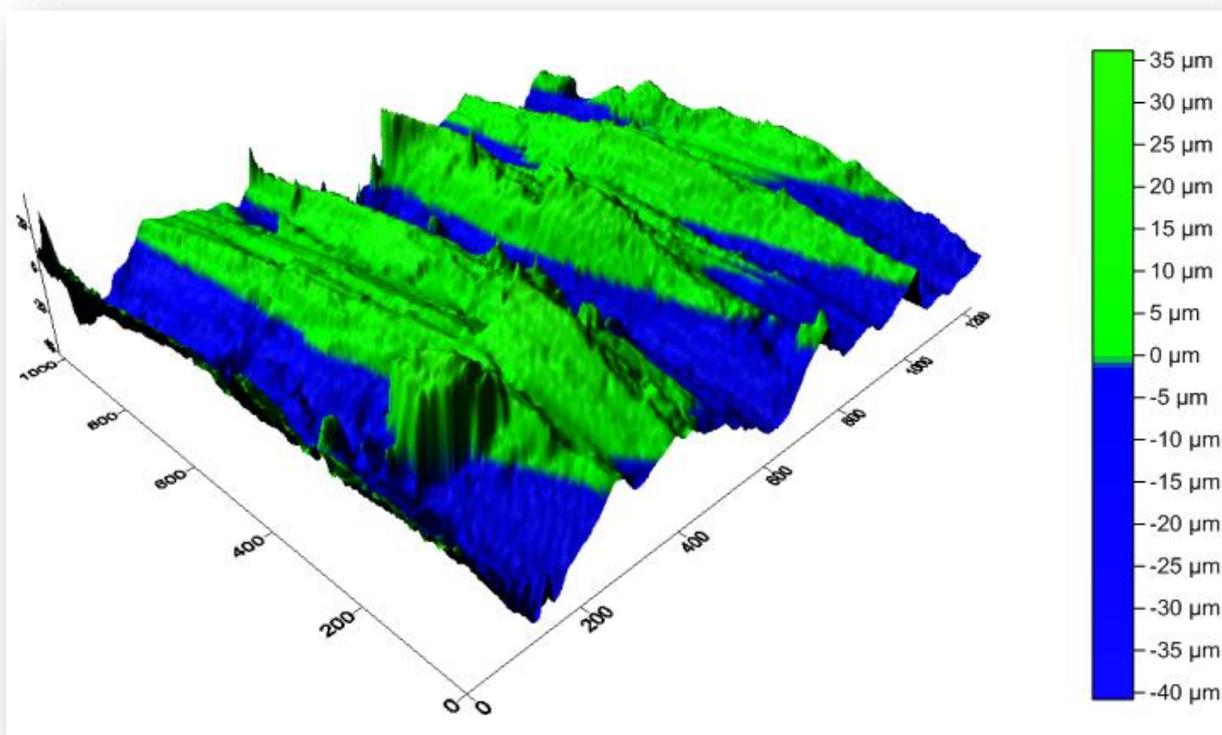


Figure III.27 : Rugosité de surface vue en 3D lors d'un usinage avec lubrification (3)

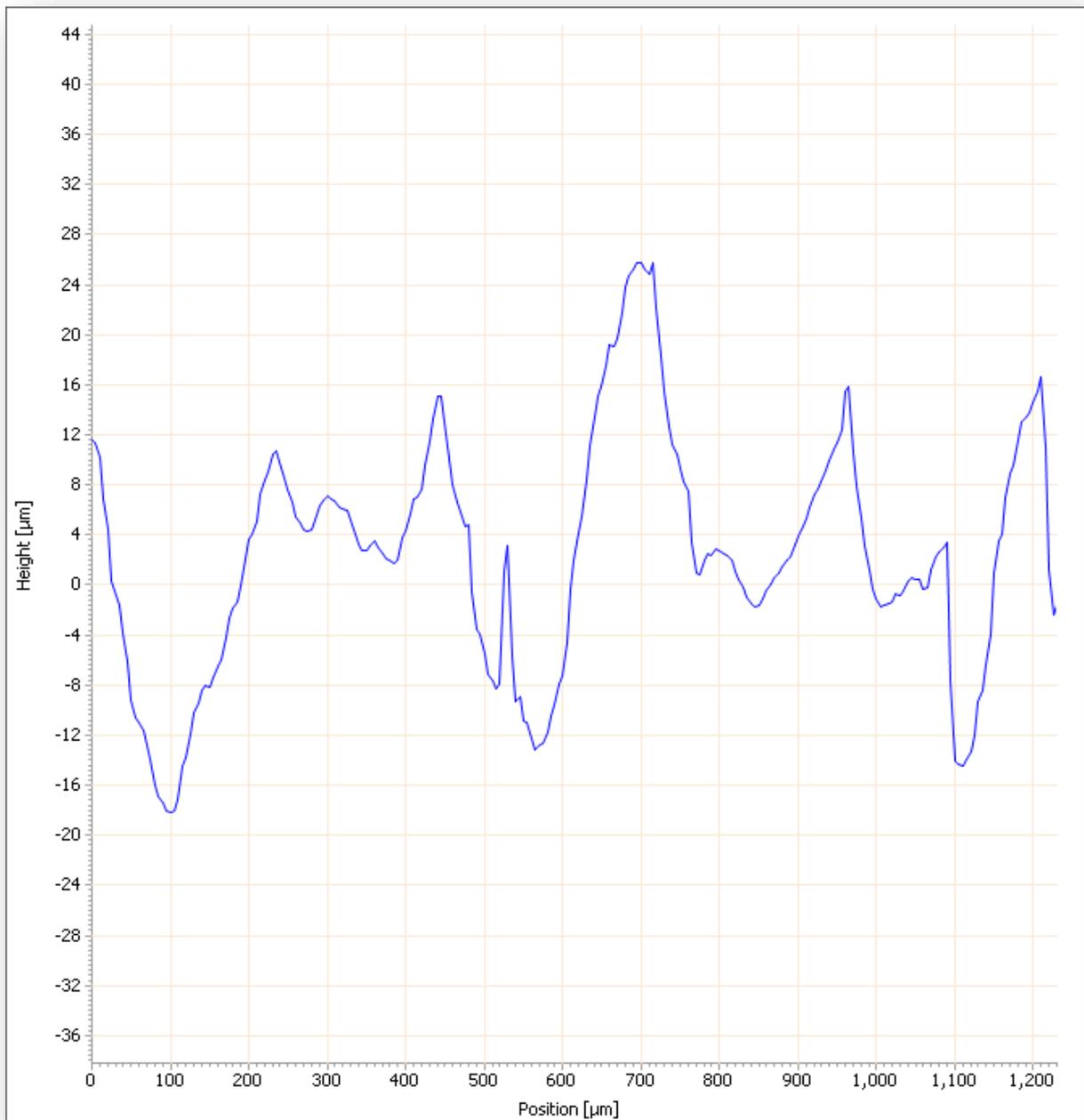


Figure III.28 : Profilographe en perspective de la surface usinée avec lubrification (3)

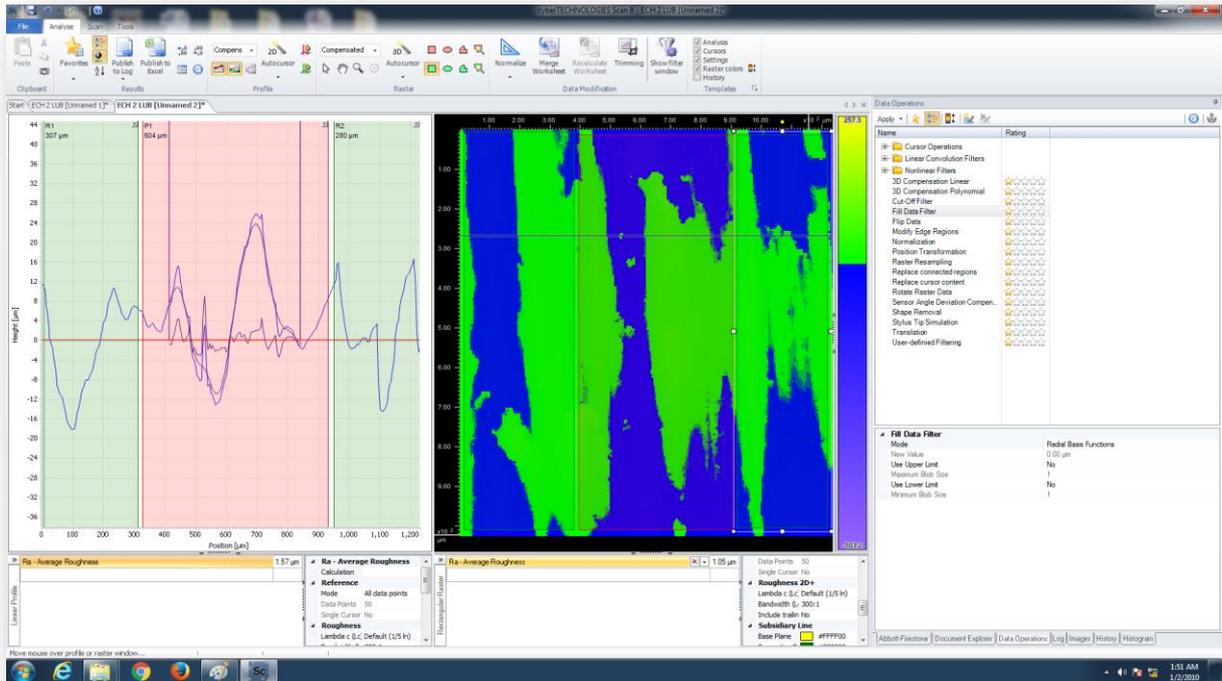


Figure III.2914 : Profilographe en perspective de la surface usinée avec lubrification (3)

III.5 Conclusion

Le présent chapitre traite l'étude de l'état de surface à l'égard de différents régime de coupe et pour différents cas d'usinage.

La rugosité Ra est une moyenne caractérisant l'état de surface d'une pièce ou d'un matériau.

Dans l'industrie mécanique, le contrôle de la rugosité fait partie des processus de validation des cotes dont le but est d'assurer la conformité de la pièce durant l'usinage.

La procédure expérimentale a concerné une mesure de rugosité de surface à l'aide d'un rugosimètre, dont l'approche est appuyée sur des vitesses d'avance ; ainsi qu'une mesure de rugosité à l'aide du cyber SCAN CT 100

Il en ressort que la variation de l'avance est proportionnelle à l'état de surface c'est-à-dire plus ce paramètre augmente, plus la rugosité de surface augmente.

Le lubrifiant améliore nettement l'état de surface au même titre que l'augmentation de vitesse ; la vitesse augmente la rugosité diminue.

Le lubrifiant assure un film entre l'outil et la pièce en diminuant le frottement (influe aussi sur la durée de vie de l'outil) et en augmentant la vitesse ce qui implique que la rugosité diminue d'où elle est meilleure.

La rugosité de surface et la longévité de l'outil dépendent directement des paramètres de coupe



CONCLUSION GENERALE



CONCLUSION GENERALE

Le présent travail a traité dans un premier temps, une recherche bibliographique, a contenu des généralités et des informations sur l'usinage essentiellement le tournage et la rugosité de surface, et dans un deuxième temps une partie expérimentale, portant sur des essais relatifs à la détermination de l'état de surface à l'égard de différents régime de coupe et pour différents cas d'usinage.

A l'issue de cette étude, des données ont été collecté en vue d'une interprétation ; conclut que :

- La surface finis d'une pièce est caractérisé par sa rugosité, le paramètre Ra nous permet de qualifié n'importe quelle surface vu son ampleur ;
- La rugosité de surface dépend de plusieurs paramètres tels que les paramètres de coupe en particulier l'avance ; la variation de l'avance est proportionnelle à l'état de surface ;
- Le lubrifiant améliore nettement l'état de surface au meme titre que l'augmentation de vitesse ;
- Le lubrifiant assure un film entre l'outil et la pièce en diminuant le frottement (influe aussi sur la durée de vie de l'outil) et en augmentant la vitesse ce qui implique une amélioration de l'état de surface.
- La rugosité de surface et la longévité de l'outil dépendent directement des paramètres de coupe

Il en ressort qu'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 désirées et qui dépend de la géométrie de l'outil, des conditions de coupe et des phénomènes mise en jeu lors de la coupe.

D'où en perspective il est nécessaire de procéder à la caractérisation topographique des surfaces.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] BAKHTI Abdelbassit et MERZOUG Aissa Recherche de l'usure de l'outil de coupe lors du tournage d'éprouvettes pour l'essai de traction Université Mohamed Boudiaf M'SILA 2017
- [2] BOUGOFFA Ramez Med Lamine L'influence des paramètres de coupe sur l'état de surface lors de l'usinage de l'acier XC48 Université Badji Mokhtar Annaba 2018
- [3] Polycopié - Coupe des Métaux1- Master, Fabrication Mécanique et Productique Université Badji Mokhtar 2018.
- [4] TAMER Hani influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface (acier XC18) Université Badji Mokhtar Annaba 2020
- [5] SAOU Salah Eddine l'influence de coupe sur la rugosité de surface lors de l'usinage de l'acier XC 48 Université Badji Mokhtar Annaba 2021
- [6] https://fr.wikipedia.org/wiki/Tournage_mécanique
- [7] <https://www.formation-industries-paca.fr/cap-gemini-recherche-preparateur-pieces-elementaires-mecaniques/>
- [8] <https://braidwoodgear.com/tournage-mecanique/#:~:text=Le%20mouvement%20de%20coupe%20est,matière%20sous%20forme%20de%20copeaux.>
- [9] <https://verdun-usinage.com/tournage-mecanique-precision/>
- [10] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Tour_\(machine-outil\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Tour_(machine-outil))
- [11] <http://www.acheter-vendre-machines.fr/2008/07/2-principe-de-fonctionnement-dun-tour.html>
- [12] <https://www.index-france.fr/fr/produits/tours-universels/traub-tna500/>
- [13] <https://www.directindustry.fr/prod/milltronics-manufacturing/product-53548-361899.html>
- [14] <https://www.usinenouvelle.com/expo/tour-a-charioter-et-fileter-a-comma-p176968.html>
- [15] <https://www.pietrocarngi.it/fr/19/ap.html>
- [16] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Chariotage>
- [17] <https://www.directindustry.fr/prod/beijing-worldia-diamond-tools-co-ltd/product-121413-1626971.html>

- [18] <https://www.directindustry.fr/prod/echaintool-industry-co-ltd/product-147466-1665028.html>
- [19] <https://www.directindustry.fr/fabricant-industriel/plaquette-coupe-66551.html>
- [20] https://elearning-deprecated.univ-annaba.dz/pluginfile.php/61114/mod_resource/content/1/Cours%20N°7.pdf
- [21] <https://www.univ-biskra.dz/enseignant/bensaada/6%20Etat%20de%20surfaces%208%20pages.pdf>
- [22] https://mip2.insa-lyon.fr/Etats%20de%20surface/gps/ordre_defaults.htm
- [22] <https://www.maxicours.com/se/cours/etat-de-surface-et-indice-de-rugosite-1/>
- [23] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Rectification_\(m%C3%A9canique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Rectification_(m%C3%A9canique))
- [24] [http://www.lyrfac.com/soutiens/knbase/pdf/rectification%20\(mecanique\).pdf](http://www.lyrfac.com/soutiens/knbase/pdf/rectification%20(mecanique).pdf)
- [25] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Superfinition>
- [26] <http://souspression.canalblog.com/archives/2011/05/02/20916838.html>
- [27] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pierrage>
- [28] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Rodage>
- [29] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Galetage>
- [30] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Lubrification>
- [31] <https://ebook-blaser.fr/coin-technique/recherche-appliquee/discussion-avec-les-4-laureats/>
- [32] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Lubrifiant_\(m%C3%A9canique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Lubrifiant_(m%C3%A9canique))
- [33] <http://leslubrifiants.unblog.fr/2017/09/22/fluides-dusinage-les-principaux-risques-et-pathologies-associees/>
- [34] https://fr.wikipedia.org/wiki/Liquide_de_coupe
- [35] <https://braidwoodgear.com/tournage-mecanique/>