

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Département Génie Mécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie Mécanique

Spécialité : Génie des matériaux

Par

- *Lebidi Fatima Zahra*
- *Salik Cheyma*

Intitulé

Evaluation des performances des outils de coupe en céramique

Soutenu le : 06_07_2023

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Bentoumi Mohamed</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Laouissi Aissa</i>	<i>MRB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>CRM_Costantine</i>
<i>M. Raouache Elhadj</i>	<i>MCA</i>	<i>Co-Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Walid Dairi</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

Nous remercions Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de nous avoir donné la santé et tout dont nous nécessitions pour l'accomplissement de cette mémoire.

Nous tenons à remercions tous les membres de familles pour la patience, les encouragements, la gentillesse et le soutien qu'ils ont prodigués tous au long de ce travail.

Au cours de nos travaux, nous avons été encadrés par Dr. Laouissi Aissa, aussi Dr. Raouache Elhadj. Nous leurs adressons nos respectueux remerciements pour leurs disponibilités et pour nous avoir fait bénéficier de leurs connaissances scientifiques et de leurs conseils.

Nous exprimons notre sincère gratitude à tous les membres du jury et les saluons pour leurs qualités humaines et les remercions de nous honorer en acceptant le jugement et en évaluant ce travail.

Notre gratitude et nous remerciements vont aussi aux techniciens de centre de recherche en mécanique (CRM-Constantine).

Enfin, nous remercions tous ceux qui de près ou de loin m'ont permis de mener ce travail à son terme.

Dédicaces

C'est avec un grand plaisir que Je dédie ce modeste travail:

A ceux qui m'ont aimé, protégé, a ce qui ont sacrifié les plus belles années de leurs vis pour me voir réussir.

A ma très chère **mère**, qui m'a tout donné depuis mon enfance, que dieu la protégé et la garde pour nous.

A mon très cher **père**, qui m'a tout donné, je te remercie infiniment de tes sacrifices.

A mon cher frère « Ilyes ».

A mes chères sœurs « Nadjla », « Chahira », « Meriem », « Aridje ».

A mes petits « **Abd el rahim** », « **Fourat** », « **Jana** ».

A mes grandes mères « Fatma », « Aicha ».

Et a toutes les familles « Lebidi »et « Belalit ».

A tous les amis « Chahra », « Nesrine », « Rayen », « Amina », « Amani », « Rebiha »...

A mes chers deux amis "Chanez " et "Chaima", qui a commencé la carrière universitaire de 5ans avec moi, et nous le terminerons ensemble.

A tous les étudiants de ma classe et mes professeurs de génie mécanique.

FATIMA ZAHRA

Je dédie ce mémoire :

A la lumière de ma vie mon très cher père merci pour son soutien, son affection et la confiance qu'il m'a accordé "**Djahid**".

A mon paradis ma mère pour son amour, ses encouragements et ses sacrifices "**Akila**".

A mes plus belle soeurs "Zeynab" et "soundous" merci pour rester à mes côtés dans mes moments difficiles

A mes très chers frères "Ismail" et "Sadam"

A mes meilleurs amis "Youssra" , "Khadija" , "Fatima" ,"Ahlam"

A Mes chers deux amis "chanez " et "fatima", qui a commencé la carrière universitaire de 5ans avec moi, et nous le terminerons ensemble

*UNE SPECIALE DEDICACE A UNE PERSONNE QUI M'A DONNE UN SENTIMENT
SPECIAL DANS MA VIE «Nani »*

Et a tous ceux qui ont contribue de pres ou de loin pour que ce travail soit possible, je vou dis merci

CHEYMA

Résumé : Avec 15 % de la production mondiale, les procédés d'usinage représentent une part importante de la production de composants mécaniques. L'adoption de paramètres de coupe plus exigeants (vitesses de coupe plus élevées, avance, etc.) par les fabricants est le résultat du besoin croissant d'une plus grande productivité et du développement de nouvelles machines sophistiquées. L'usure rapide des outils de coupe est alors l'une des nouvelles problématiques auxquelles l'usinage doit faire face. La qualité des pièces et le coût d'usinage sont impactés par l'usure des outils de coupe. Lorsque l'usure atteint un point critique, les forces de coupe, la pression de coupe spécifique, la rugosité de surface, la température et les vibrations augmentent considérablement et détériorent la stabilité de la coupe. L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'impact des paramètres de coupe et le revêtement de l'outil de coupe sur l'évolution de l'usure en dépouille (V_b), les l'effort de coupe et la rugosité de surface lors du tournage de la fonte EN-GJL-250 à l'aide des outils céramiques en nitrure de silicium (Si_3N_4) revêtus par CVD-TiAlN et non revêtus. L'examen de l'usure a été effectué à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB), La spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDS) et La diffraction des rayons X (DRX). Les résultats ont bien démontré le rôle du revêtement dans l'amélioration de la résistance à l'usure et la qualité des surfaces usinées.

Mots clés : Usinage, Usure, Céramique, Revêtement, CVD, Fonte grise.

Abstract: Machining operations constitute an important part of the manufacture of mechanical components, with around 15% of global production. The growing demand for greater productivity and the development of new sophisticated machines have led manufacturers to adopt more severe cutting parameters (increased cutting speeds, advances, etc.). Machining is then confronted with new problems, one of the most decisive being the rapid wear of the cutting tools. The wear of the cutting tools influences the quality of the parts and the cost of machining. When the wear reaches a certain critical value, the cutting forces, the specific cutting pressure, the surface roughness, the temperature, and the vibrations increase significantly and deteriorate the stability of the cut. The main objective of this work is to study the impact of the cutting parameters and the coating of the cutting tool on the evolution of the flank wear (V_b), the cutting force, and the roughness of the surface when turning cast iron EN-GJL-250 using CVD-TiAlN coated and uncoated Silicon Nitride (Si_3N_4) ceramic tools. Examination of wear was carried out using a scanning electron microscope (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS), and X-ray diffraction (XRD). The results clearly demonstrated the role of the coating in improving the wear resistance and the quality of the machined surfaces.

Keywords: Machining, Wear, Ceramic, Coating, CVD, Gray cast iron.

المخلص: تشكل عمليات التصنيع جزءاً هاماً من تصنيع المكونات الميكانيكية بحوالي 15% من الإنتاج العالمي. أدى الطلب الملخص: تشكل عمليات التصنيع جزءاً هاماً المتزايد على إنتاجية أكبر ، وتطوير ألت متطورة جديدة ، إلى تبني الشركات المصنعة لمعايير قطع أكثر صرامة (زيادة سرعات القطع ، والتقدم ، وما إلى ذلك ...). ثم تواجه عملية التصنيع مشاكل جديدة ، وأهمها التآكل السريع الأدوات القطع. يؤثر تآكل أدوات القطع على جودة الأجزاء وتكلفة التصنيع، عندما يصل التآكل إلى قيمة معينة، تزداد قوى القطع وضغط القطع المحدد وخشونة السطح ودرجة الحرارة والاهتزازات بشكل كبير وتتسبب في تدهور استقرار القطع. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير معلمات القطع على تطور تآكل الجناح (V_b) ، وقوة القطع وخشونة السطح أثناء تصنيع حديد الزهر -EN 250-GJL باستخدام أدوات سيراميك نيتريد السيليكون (Si_3N_4) غير المطلي و المطلي بـ CVD-TiAlN. تم إجراء فحص التآكل باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) ، مطيافية الأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDS) وحيود الأشعة السينية (XRD). أظهرت النتائج بوضوح دور الطلاء في تحسين مقاومة التآكل وجودة السطح الـ مشكلة.

الكلمات المفتاحية : التصنيع، التآكل، سيراميك؛ طلاء، CVD، الحديد الزهر الرمادي.

Liste des figures

CHAPITRE I : Etude bibliographique

Figure I.1 : Classification des carbures métalliques.	7
Figure I.2 : Carbures métalliques.	10
Figure I.3 : Deux grades de microstructures de l'outil CBN : (a) grain de 6 à 22 μm (liant B, N, Al) (b) grain de 1 à 4 μm (liant B, N, Al, Ti, Co, W).	12
Figure I.4 : Paramètres du processus de tournage.	14
Figure I.5 : Les paramètres de coupe.	15
Figure I.6 : Quatre facteurs influençant l'usure des outils.	16
Figure I.7 : Schéma d'usure typique selon la norme ISO 3685.	17
Figure I.8 : Usure en dépouille.	18
Figure I.9 : Stades typiques de l'usure en dépouille.	19
Figure I.10 : Usure en cratère.	20
Figure I.11 : Usure en entaille.	20
Figure I.12 : Arête rapportée.	21
Figure I.13 : Usure abrasive de l'outil en carbure.	22
Figure I.14 : Usure adhésive.	23
Figure I.15 : Diffusion.	24
Figure I.16 : Mécanisme de formation de l'oxydation.	24
Figure I.17 : Impacts du revêtement pendant la coupe.	25
Figure I.18 : Étapes du dépôt d'un revêtement par PVD.	28

Figure I.19 : topographie de surface.	29
Figure I.20 : Critères de rugosité.	30
Figure I.21 : Hauteur maximale de l'irrégularité.	32
Figure I. 22 : Hauteur en dix points des irrégular.	33
Figure I.23 : Diagramme fer-carbone.	34
Figure I.24 : Micrographie de fonte à graphite Sphéroïdal.	35
Figure I.25 : Fonte grise lamellaire.	36
Figure I.26 : Fonte blanche hypoeutectique.	37
Figure I.27 : Microstructure de la fonte malléable.	38

CHAPITER II : Procédures expérimentales

Figure II.1 : Eprouvettes en EN-GJL-250utilisées.	41
Figure II.2: Chariotage de l'éprouvette.	41
Figure II.3: Tour parallèle Turnado 230/1500 V.	42
Figure II.4 : forme géométrique des Plaquettes de coupe utilisées.	44
Figure II.5 : Porte-outil utilisé.	44
Figure II.6 : (a) Dynamomètre à quartz standard (KISTLER 9257B), (b) Position du dynamomètre d'effort de coupe.	45
Figure II.7 : Amplificateur de charge (KISTLER 5019B130) & dispositif de programmation graphique (DYNOWARE 2825A1-1).	46
Figure II.8 : Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE.	46
Figure II.9 : ROUGHNESS tester (PCE-RT1200).	47
Figure II.10: Mesure de la rugosité sans démontage de la pièce.	47
Figure II .11: Profilomètre AltiSurf 500.	48
Figure II.12 : Rugosité de surface 2D et 3D mesurée par la plate-forme AltiSurf-500.	48
Figure II.13 : (a) Microscope optique Visuel Gage 250, (b) Logiciel visuel Gage 2.2.0	49

Figure II.14 : principe de microscopie électronique à balayage. 50

Figure II.15 : Condition de Bragg, principe de diffraction de rayons X 51

CHAPITER III : Analyse et discussion des résultats

Figure III.1 : Types d'usure d'outils 3D basés sur ISO 3685.	54
Figure III. 2 : Evolution de l'usure des outils de coupe en fonction du temps d'usinage.	55
Figure III. 3 : Evolution de K_c (a) et F_z (b) en fonction de l'usure des outils en Si_3N_4 non revêtus revêtus en CVD-TiAlN .	56
Figure III. 4 : Evolution de R_a en fonction de l'usure des outils en Si_3N_4 non revêtus revêtus en CVD-TiAlN .	57
Figure III.5 : Analyse par DRX de l'outil revêtu.	59
Figure III.6 : Usure en dépouille de CC6090 et CC1690.	60
Figure III.7 : Images de MEB de la plaquette revêtue.	61
Figure III.8 : Images de MEB de la plaquette non revêtue.	62
Figure III.9 : Spectres EDS des plaquette CC1690 et CC6090 après l'usinage.	64
Figure III.10 : Cartographie élémentaire de C, Si, N, Al, Fe et Ti sur l'arrête de coupe de l'outil en Si_3N_4 revêtu en CVD-TiAlN .	65
Figure III.11 : Microstructure of graphite in gray cast iron.	66
Figure III.12 : Topographie de surface 3D de surface usinée par CC1690 (début d'usinage).	67
Figure III.13 : Topographie de surface 3D de surface usinée par CC1690 (fin d'usinage).	67
Figure III.14 : Topographie de surface 3D de surface usinée par CC6090 (début d'usinage).	68
Figure III.15 : Topographie de surface 3D de surface usinée par CC6090 (fin d'usinage).	68

Liste des tableaux

Tableau II. 1 : Composition chimique de la fonte FGL 250	40
Tableau II. 2 : <i>Caractéristiques de la machine-outil.</i>	42
Tableau II.3 : <i>Caractéristiques techniques de la plaquette utilisée</i>	43
Tableau II.4 : <i>dimensions du porte-outil utilisé.</i>	44
Tableau II.5 : <i>Vitesse de palpeur et longueurs de mesure.</i>	47
Tableau III.1 : valeurs de déformation ϵ et la taille des grains	58

Nomenclatures

Vc Vitesse de coupe, [m/min].

f Avance par tour, [mm/tr].

ap Profondeur de passe, [mm].

Vb Usure en dépouille, [mm].

BUE Arrête rapportée Ra Rugosité moyenne arithmétique, [μm].

Fz Effort de coupe tangentielle, [N].

Kc Pression spécifique de coupe, [N/mm^2].

Rz Rugosité moyenne profondeurs [μm].

Rt Rugosité totale [μm].

CC1690 Céramique revêtue

CC6090 Céramique non revêtue

ε Déformation

D Taille de grain

Table des matières

Remerciements

Dédicace

Liste des Tableaux

Liste des figures

Nomenclatures

Introduction Générale

Chapitre I: Etude Bibliographique

I.1. Introduction :	6
I.2.Coupe des métaux :	6
I.2.1.Importance de la coupe des métaux:	6
I.2.2.Matériaux des outils de coupe :	7
a) Aciers rapides (HSS) :	8
b) Carbures :	9
c) Cermets :	10
d) Céramique :	10
e) Nitrure de silicium :	11
f) Nitrure de bore cubique (CBN) :	11
g) Diamant :	13

I.3.Paramètres du processus de tournage :	13
I.4.Régime de coupe :	14
I.4.1.Vitesse de coupe :	14
I.4.2.L'avance :	15
I.4.3.Profondeur de coupe.....	15
I.5.Usure de l'outil :	15
I.5.1.Types d'usure des outils :	17
a) Usure en dépouille :	17
b) Usure en cratère :	19
c) Usure en entaille :	20
d) Arête rapportée :	20
I.5.2.Mécanismes d'usure :	21
a) Abrasion :	21
b) Adhésion :	22
c) Diffusion :	23
d) Oxydation :	24
I.6.Revêtements :	25
I.6.1.Nécessité des revêtements et des techniques de revêtement :	25
I.6.2.Différents types de revêtements :	26
I.6.3.Technologies de revêtement	26
a) Dépôt chimique en phase vapeur :	26
b) Dépôt physique en phase vapeur :	27
I.7.Intégrité de la surface :	29
I.7.1.Paramètres d'état de surface :	29
I.7.1.1.Écart moyen arithmétique (Ra) :	30

I.7.1.2.Méthode du carré moyen de la route (Rq) :.....	31
I.7.1.3.La hauteur de crête (Rp) :	31
I.7.1.4.Hauteur maximale du profil (Rt) :.....	31
I.7.1.5.Hauteur de dix points d'irrégularités (Rz) :	32
I.8. LES FONTES :.....	33
I.8.1 Définition :	33
I.8.2.Classification des fontes :	34
I.8.2.1. Fontes grises :	35
I.8.2.2.Fonte à graphite sphéroïdal :	35
I.8.2.3.Fontes grises à graphite lamellaire :	35
I.8.2.4fontes blanches :	36
I.8.2.5.Fonte malléable :	37
I.9.conclusion	38

Chapitre II: Procédures expérimentales

II.1.Introduction:	40
II.2.Equipements utilisés :.....	40
II.2.1. Éprouvettes :	40
II.2.2.Préparation de l'éprouvette :	41
II.2.3. Machine-outil :.....	42
II.2.4. Plaquettes de coupe :.....	43
<i>a) Plaquette en céramique revêtue CCI690</i> :.....	43
<i>b) Plaquette en céramique non revêtue CC6090</i> :.....	43
II.2.5. Porte-outils :.....	44

II.2.6. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe :	45
II.2.7. Mesure de la rugosité de surface :	46
II.2.7.1. Rugosité 2D :	46
II.2.7.2. Rugosité 3D :	47
II.2.8. Microscope optique pour la quantification de l'usure :	49
II.2.9. Microscopie Électronique à Balayage :	50
II.2.10. Diffraction des rayons X :	50
II.3. Conclusion	51

Chapitre III: Analyse et discussion des résultats

III.1. Introduction	53
III.2. Evolution de l'usure des outils de coupe en fonction de temps d'usinag	53
III.3. Influence de l'usure sur les paramètres technologique de l'usinage	55
III.3. 1. Influence de l'usure sur les efforts et la pression de coupe	55
III.3.2. Influence de l'usure sur la rugosité de surface	56
III.4. Caractérisation par DRX	57
III.5. Mécanismes d'usure des outils de coupe	59
III.6. Analyse de la rugosité de surface 3D	65
III.5. Conclusion	69

Introduction Générale

Avec 15 % de la production mondiale, les procédés d'usinage représentent une part importante de la production de composants mécaniques. L'adoption de paramètres de coupe plus exigeants (vitesses de coupe plus élevées, avance, etc.) par les fabricants est le résultat du besoin croissant d'une plus grande productivité et du développement de nouvelles machines sophistiquées. L'usure rapide des outils de coupe est alors l'une des nouvelles problématiques auxquelles l'usinage doit faire face. La qualité des pièces et le coût d'usinage sont impactés par l'usure des outils de coupe. Lorsque l'usure atteint un point critique, les forces de coupe, la pression de coupe spécifique, la rugosité de surface, la température et les vibrations augmentent considérablement et détériorent la stabilité de la coupe. En effet la pression spécifique dans les surfaces de contact de la partie active d'un outil de coupe est de l'ordre de 10^3 à 2×10^3 MPa et la température d'échauffement dans ce cas varie de 100°C à 1000°C et même plus dans l'usinage des métaux durs, notamment les fontes trempées et les aciers traités.

Dans le cadre de l'optimisation du processus de coupe, la connaissance de la phénoménologie de l'usinage est importante mais celle de l'usure est indispensable. De ce fait, l'étude de l'usure des outils de coupe, les revêtements et leurs effets sur la qualité des surfaces usinées figure parmi les principaux objectifs de la recherche actuelle sur la coupe des métaux. A cet égard une étude expérimentale profonde sur l'influence des revêtements CVD-TiN sur l'usure des outils de coupe en nitrure de silicium (Si_3N_4) adaptées à l'usinage à sec des fontes, les efforts de coupe et la qualité des surface usinées lors du tournage longitudinal de la fonte grise EN-GJL-250 a été présentée à travers le présent mémoire.

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire s'articulent autour de trois chapitres :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur l'usinabilité des matériaux métalliques, les principales définitions sur le tournage, l'usure des outils de coupe, la rugosité de surface, les fontes et le choix des matériaux de coupe.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons la procédure suivie ainsi que les équipements utilisés pour l'élaboration des expériences.

Le troisième chapitre est consacré à une étude expérimentale sur l'influence des revêtements CVD-TiAlN sur l'usure des outils de coupe en nitrure de silicium (Si_3N_4) usinées lors du tournage longitudinal de la fonte grise EN-GJL-250.

En dernier lieu, ce mémoire se termine par une conclusion générale suivie et les références bibliographiques utilisées.

Chapitre I:
Etude
Bibliographique

Chapitre I

Etude Bibliographique

Sommaire

I.1. INTRODUCTION :	6
I.2. COUPE DES METAUX :	6
I.2.1. Importance de la coupe des métaux :	6
I.2.2. Matériaux des outils de coupe :	7
a) Aciers rapides (HSS) :	8
b) Carbures :	9
c) Cermets :	10
d) Céramique :	10
e) Nitrure de silicium :	11
f) Nitrure de bore cubique (CBN) :	11
g) Diamant :	13
I.3. PARAMETRES DU PROCESSUS DE TOURNAGE :	13
I.4. REGIME DE COUPE :	14
I.4.1. Vitesse de coupe :	14
I.4.2. L'avance :	15
I.4.3. Profondeur de coupe :	15
I.5. USURE DE L'OUTIL :	15
I.5.1. Types d'usure des outils :	17

a) Usure en dépouille :	17
b) Usure en cratère :	19
c) Usure en entaille :	20
d) Arête rapportée :	20
I.5.2.Mécanismes d'usure :	21
a) Abrasion :	21
b) Adhésion :	22
c) Diffusion :	23
d) Oxydation :	24
I.6.REVETEMENTS :	25
I.6.1.Nécessité des revêtements et des techniques de revêtement :	25
I.6.2.Différents types de revêtements :	26
I.6.3.Technologies de revêtement	26
a) Dépôt chimique en phase vapeur :	26
b) Dépôt physique en phase vapeur :	27
I.7.INTEGRITE DE LA SURFACE :	29
I.7.1.Paramètres d'état de surface :	29
I.7.1.1.Écart moyen arithmétique (Ra) :	30
I.7.1.2.Méthode du carré moyen de la route (Rq) :	31
I.7.1.3.La hauteur de crête (Rp) :	31
I.7.1.4.Hauteur maximale du profil (Rt) :	31
I.7.1.5.Hauteur de dix points d'irrégularités (Rz) :	32
I.8. LES FONTES :	33
I.8.1 Définition :	33
I.8.2.Classification des fontes :	34

I.8.2.1. Fontes grises :	35
I.8.2.2. Fonte à graphite sphéroïdal :	35
I.8.2.3. Fontes grises à graphite lamellaire :	35
I.8.2.4. fontes blanches :	36
I.8.2.5. Fonte malléable :	37
I.9. CONCLUSION :	38

I.1. Introduction :

Ce chapitre traite de l'importance du processus d'usinage, des outils de coupe et des différentes méthodes utilisées pour le revêtement des outils de coupe. L'usure des outils et l'intégrité des surfaces sont discutés. Enfin, des généralités sur les fontes, sont également établis.

I.2. Coupe des métaux :

Dans le secteur de la fabrication de pièces métalliques, des pièces de différentes formes, dimensions et matériaux sont usinées. Les différents processus de travail se répartissent en deux groupes : la mise en forme sans enlèvement de copeaux, c'est-à-dire le forgeage, l'emboutissage, l'étirage, etc. et la mise en forme avec enlèvement de copeaux, c'est-à-dire le tournage, le fraisage, le perçage, etc. Lors de la mise en forme par coupe, la surface finie de la forme et des dimensions souhaitées est obtenue en séparant une couche de la pièce de base sous forme de copeaux.[1]

Le processus de coupe des métaux, au cours duquel un copeau est formé, est affecté par un mouvement relatif entre la pièce à usiner et l'arête dure d'un outil de coupe maintenu contre la pièce à usiner. Ce mouvement relatif est causé par un amalgame de mouvements de rotation et de translation qui peuvent concerner la pièce ou l'outil de coupe, voire les deux. En fonction de la nature de ce mouvement relatif, l'usinage des métaux est classé en trois catégories : tournage, alésage, rabotage, etc. Dans le tournage, le mouvement de la pièce est rotatif et le mouvement de l'outil de coupe est une translation vers l'avant.[2]

I.2.1. Importance de la coupe des métaux :

Le découpage des métaux est l'un des processus primordiaux de mise en forme des composants dans l'industrie manufacturière. Les opérations de découpe des métaux représentent 15% de la valeur de tous les composants mécaniques fabriqués dans le monde.

Les facteurs suivants expliquent l'importance croissante du découpage des métaux [2]:

Des matériaux d'un large spectre peuvent être usinés.

La possibilité de fabriquer des pièces d'une grande variété ainsi que des caractéristiques géométriques exclusives telles que des perçages ronds d'une plus grande précision, des filets de vis, des arêtes ainsi que des surfaces extrêmement rectilignes.

Une bonne précision dimensionnelle et un bon état de surface sont obtenus grâce à l'usinage des métaux.

I.2.2. Matériaux des outils de coupe :

Les classes de matériaux d'outils de coupe actuellement utilisées pour les opérations d'usinage sont l'acier rapide supérieur, les alliages à base de cobalt, les carbures cémentés, la céramique, le nitrure de bore cubique poly cristallin et le diamant poly cristallin. (Figure I.1). Différentes applications d'usinage nécessitent différents matériaux d'outils de coupe.

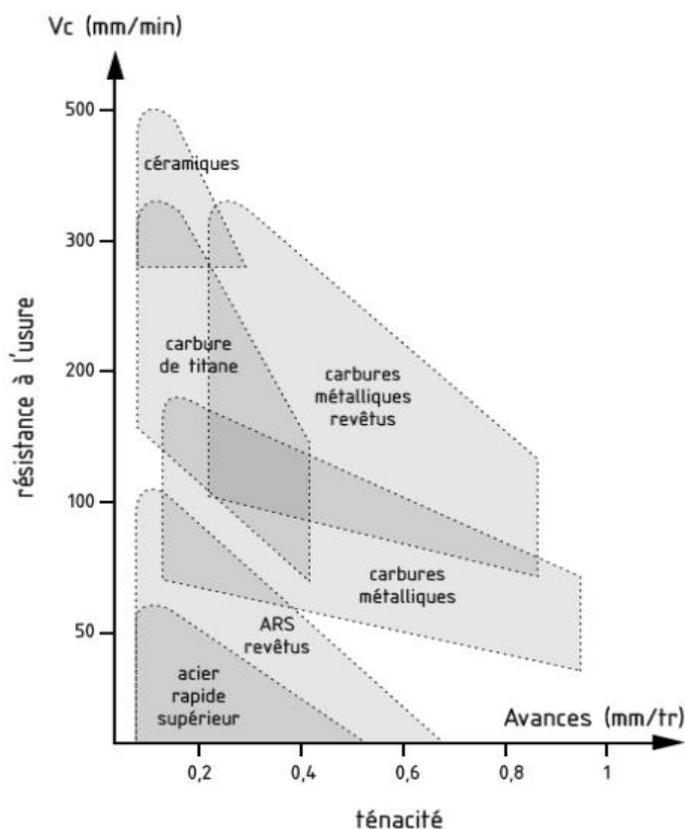


Figure I. 1 : Classification des matériaux de coupe [3].

Le matériau d'outil de coupe idéal doit présenter toutes les caractéristiques suivantes :

- Plus dur que la pièce qu'il coupe.
- Stabilité à haute température
- Résiste à l'usure et aux chocs thermiques
- Résistant aux chocs
- Inerte chimiquement vis-à-vis du matériau à usiner et du liquide de coupe.

Pour choisir efficacement des outils pour l'usinage, un machiniste ou un ingénieur doit avoir des informations spécifiques sur :

- La forme de la pièce de départ et de la pièce finie.
- La dureté de la pièce à usiner
- La résistance à la traction du matériau
- L'abrasivité du matériau
- Le type de copeaux générés

Les matériaux d'outils de coupe les plus courants sont décrits ci-dessous :

a) Aciers rapides (HSS) :

Les outils HSS sont ainsi nommés car ils ont été développés pour couper à des vitesses plus élevées. Développés vers 1900, les HSS sont les aciers à outils les plus fortement alliés. Le tungstène (série T) a été développé en premier et contient généralement 12 à 18 % de tungstène, plus environ 4 % de chrome et 1 % de plomb.

- 5 % de vanadium. La plupart des nuances contiennent environ 0,5% de molybdène et la plupart des nuances contiennent 4

- 12% de cobalt.

On a rapidement découvert que le molybdène (dans des proportions moindres) pouvait remplacer la majeure partie du tungstène, ce qui a permis d'obtenir une formulation plus

économique, offrant une meilleure résistance à l'abrasion que la série T et subissant moins de déformation pendant le traitement thermique. Par conséquent, environ 95 % de tous les outils en acier rapide sont fabriqués à partir des qualités de la série M. Ces qualités contiennent du molybdène et du tungstène. Celles-ci contiennent 5 à 10% de molybdène, 1,5 à 10% de tungstène, 1 à 4% de vanadium, 4% de chrome et de nombreuses nuances contiennent 5 à 10% de cobalt.

Les outils en acier rapide sont résistants et adaptés aux coupes interrompues. Ils sont utilisés pour fabriquer des outils de forme complexe tels que des forêts, des alésoirs, des tarauds, des matrices et des fraises à engrenages. Les outils peuvent également être revêtus pour améliorer leur résistance à l'usure. L'acier rapide est le matériau d'outillage le plus utilisé actuellement. Les vitesses de coupe typiques utilisées pour ce type d'outil sont comprises entre 10 et 60 m/min.

b) Carbures :

Également connus sous le nom de carbures cémentés ou carbures frittés, ils ont été introduits dans les années 1930 et présentent une dureté élevée sur une large gamme de températures, une conductivité thermique élevée, un module de Young élevé, ce qui en fait des matériaux d'outils et de matrices efficaces pour toute une série d'applications. Les deux groupes utilisés pour l'usinage sont le carbure de tungstène et le carbure de titane ; les deux types peuvent être revêtus ou non revêtus.

Le carbure de tungstène est l'un des nombreux composés comprenant des éléments de transition. Ces matériaux sont largement utilisés comme matériaux d'outils et occupent une position dominante en tant que matériau principal pour les outils de coupe, en raison de la composition du carbure de tungstène [4].

Les carbures de tungstène et de molybdène ont une structure hexagonale. Des changements structuraux majeurs ne se produisent pas dans ces composés rigides et fortement liés ; par conséquent, le traitement thermique ou les températures élevées ne modifient pas leurs propriétés. À des températures extrêmes, la résistance des carbures diminue rapidement, mais ils restent beaucoup plus résistants que l'acier dans presque toutes les circonstances.

L'utilisation d'outils de coupe en carbure est encouragée par leur dureté et leur stabilité dans une large gamme de traitements thermiques [5].

Le processus de production de poudre métallique permet de contrôler précisément la taille des grains de carbure ainsi que la composition chimique de l'alliage [4]. La Figure (I.2) montre comment le carbure de tungstène est assemblé sur le liant.

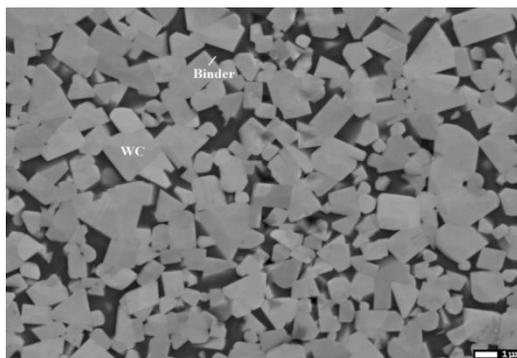


Figure I. 2 : Carbures métalliques [4].

c) Cermets :

Développés dans les années 1960, ils contiennent généralement 70% d'oxyde d'aluminium et 30% de carbure de titane. Certaines formulations contiennent du carbure de molybdène, du carbure de niobium et du carbure de tantale. Leurs performances se situent entre celles des carbures et des céramiques et les revêtements semblent offrir peu d'avantages. Les vitesses de coupe typiques utilisées pour ce type d'outil sont comprises entre 150 et 350 m/min.

d) Céramique :

Introduites au début des années 1950, deux catégories sont utilisées pour les outils de coupe : l'oxyde d'aluminium de haute pureté à grain fin (Al_2O_3) et le nitrure de silicium (Si_3N_4) sont pressés en forme de plaquettes et frittés à haute température. Des ajouts de carbure de titane et d'oxyde de zirconium (ZrO_2) peuvent être effectués pour améliorer les propriétés. Mais si le ZrO_2 améliore la résistance à la rupture, il réduit la dureté et la conductivité thermique. Des trichites de carbure de silicium (SiC) peuvent être ajoutées pour donner une meilleure

ténacité et une meilleure résistance aux chocs thermiques. Les pointes ont une résistance à l'abrasion et une dureté à chaud élevées et leur stabilité chimique supérieure à celle des aciers rapides et des carbures signifie qu'elles sont moins susceptibles d'adhérer aux métaux pendant la coupe et ont donc moins de tendance à former une ténacité et des angles de coupe négatifs sont souvent utilisés pour éviter l'écaillage en raison de leur faible résistance à la traction. Lors de l'usinage avec des outils en céramique, il est crucial d'utiliser des machines-outils et des montages rigides pour éviter les vibrations qui peuvent entraîner une défaillance prématurée de la pointe de l'outil. Les outils de coupe en céramique sont plus durs et plus résistants à la chaleur que les carbures, mais plus fragiles. Les céramiques à base d'alumine sont utilisées pour la semi-finition et la finition à grande vitesse des matériaux ferreux et de certains matériaux non ferreux. Les céramiques à base de nitrure de silicium sont généralement utilisées pour l'usinage plus grossier et plus lourd de la fonte et des superalliages. Les vitesses de coupe typiques utilisées pour ce type d'outil sont comprises entre 150 et 650 m/min.

e) Nitrure de silicium :

C'est un matériau d'outil à base de nitrure de silicium, qui a été développé dans les années 1970. Ces outils peuvent également contenir de l'oxyde d'aluminium, de l'oxyde d'yttrium et du carbure de titane. Le nitrure de silicium (Si_3N_4) possède des propriétés intéressantes, telles qu'un faible coefficient de dilatation thermique ($3,2 \times 10^{-6}$), une dureté élevée (environ 2000 HV) et une meilleure résistance à la compression que l'aluminium (environ 900 MPa), une résistance aux chocs thermiques[4]. Ce matériau est recommandé pour l'usinage des fontes et des superalliages à base de nickel à des vitesses de coupe moyennes.

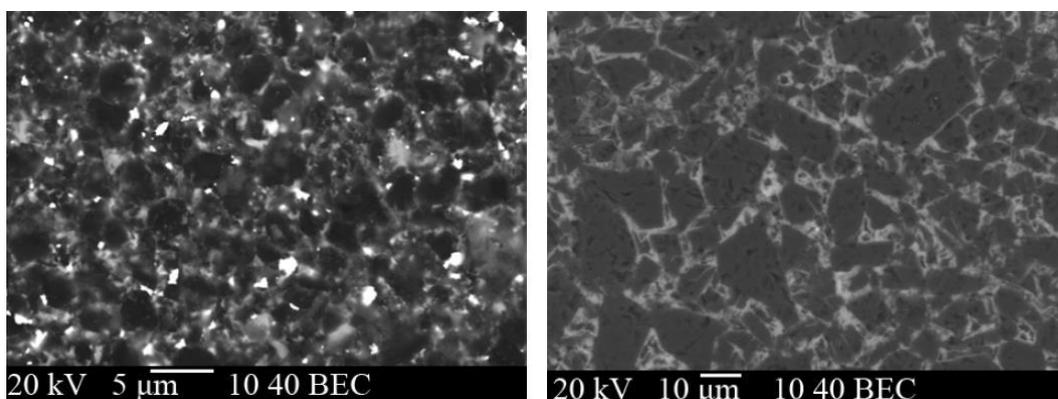
f) Nitrure de bore cubique (CBN) :

Introduit au début des années 1960, il s'agit du deuxième matériau le plus dur après le diamant. L'outil de coupe CBN est également connu sous le nom de nitrure de bore cubique poly cristallin. Cet outil de coupe est fabriqué par la métallurgie des poudres, où les grains de CBN sont frittés avec un matériau liant, et il est devenu un matériau très attrayant pour être appliqué comme matériau d'outil de coupe qui peut surmonter certaines difficultés rencontrées lors de l'usinage de matériaux difficiles à couper. Ces outils de coupe présentent

quelques propriétés mécaniques et physiques souhaitables. Ses propriétés offrent une haute et une bonne stabilité thermique[5].

L'outil CBN est considéré comme un matériau de haute dureté, proche du diamant [8, 9]. C'est pourquoi il existe une longue liste d'applications du nitrure de bore cubique polycristallin comme matériau d'outil de coupe pour l'usinage des alliages difficiles à couper. En outre, ces outils de coupe offrent une excellente dureté à chaud, ce qui permet d'utiliser ce matériau à des vitesses de coupe très élevées. Ils présentent également une bonne résistance aux chocs thermiques et une bonne ténacité [10].

Les microstructures des outils CBN sont présentées dans la Figure (I.3). La distribution globale des gros grains est relativement uniforme mais il y a encore quelques agglomérations de liant. La Figure (I.3a) montre que la distribution de la microstructure des grains fins est déséquilibrée, et la Figure (I.3b) montre un exemple d'échantillon avec une grande quantité d'agglomérations de liant [10].



a) Grain de 6 à 22 μm [11]

b) Grain de 1 à 4 μm [11]

Figure I. 3: Deux grades de microstructures de l'outil CBN : (a) grain de 6 à 22 μm (liant B, N, Al) (b) grain de 1 à 4 μm (liant B, N, Al, Ti, Co, W).

g) Diamant :

Le diamant poly cristallin ou PCD est l'un des matériaux d'outillage les plus durs et les plus résistants à l'abrasion disponibles sur le marché. Il se compose de particules de diamant (grains de diamant) qui sont frittées avec un liant métallique (cobalt). Mais le coût élevé de ces matériaux a limité son utilisation à des applications où d'autres matériaux d'outils ne peuvent pas fonctionner avec succès. En raison de la très grande dureté du diamant, il donne de bons résultats dans les cas où l'abrasion est le principal mécanisme d'usure. Ainsi, toutes les formes d'outils en PCD présentent un taux d'usure beaucoup plus faible et une durée de vie plus longue que les carbures ou les oxydes[6].

L'orientation aléatoire des cristaux de diamant empêche la propagation des fissures, ce qui améliore la ténacité. En raison de sa réactivité, le PCD ne convient pas à l'usinage des aciers au carbone ordinaires ou des alliages à base de nickel, de titane et de cobalt. Le PCD convient le mieux aux coupes de finition légères et ininterrompues à presque toutes les vitesses et est principalement utilisé pour l'usinage à très grande vitesse des alliages d'aluminium et de silicium, des composites et d'autres matériaux non métalliques. Les vitesses de coupe typiques utilisées pour ce type d'outil sont comprises entre 200 et 2000 m/min.

I.3.Paramètres du processus de tournage :

Les paramètres de processus qui affectent les caractéristiques des pièces tournées sont : les paramètres liés à la pièce à usiner - métallographie et dureté ; les paramètres de l'outil de coupe - géométrie et matériau de l'outil ; le régime de coupe - vitesse de coupe, l'avance et profondeur de coupe ; les paramètres de l'environnement de coupe - lubrification humide, sèche et quantité minimale ; les paramètres du système - rigidité statique et rigidité dynamique. L'optimisation des paramètres de processus a été largement utilisée dans les opérations de tournage. Le diagramme en arête de poisson de la classification des paramètres du processus de tournage est présenté à la Figure (I.4).

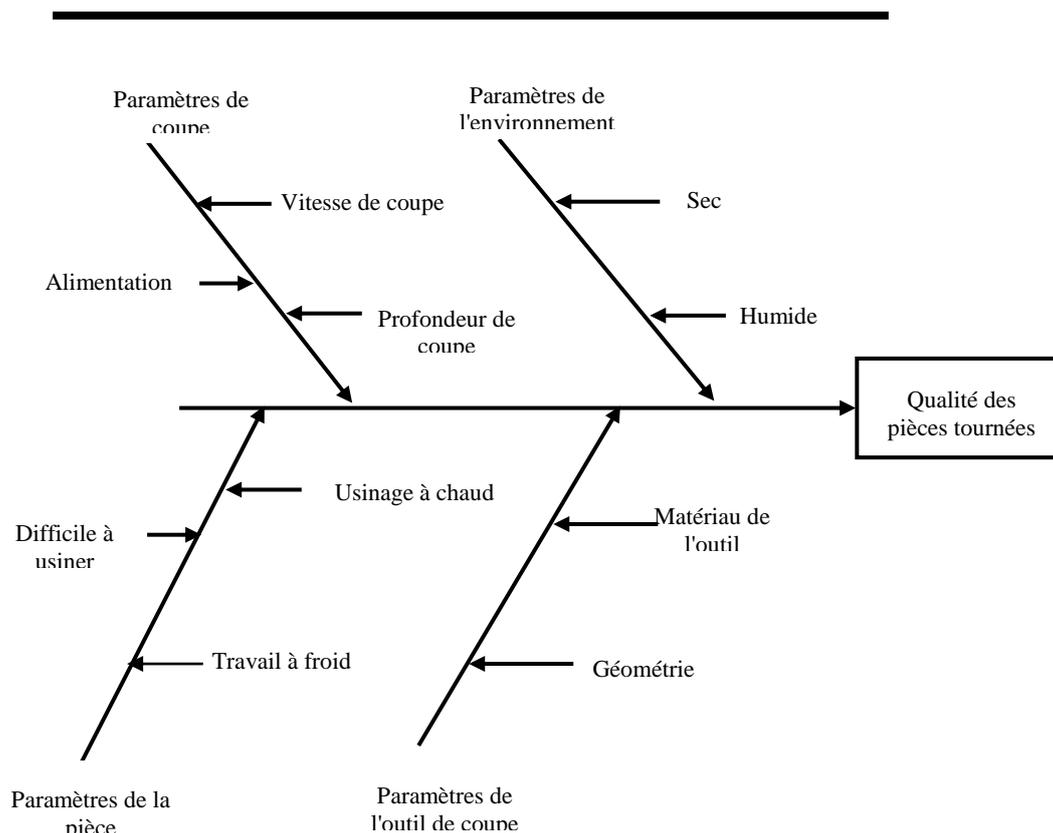


Figure I. 4 : Paramètres du processus de tournage [2].

I.4.Régime de coupe :

Les trois paramètres de coupe du tournage sont la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe, qui affectent les caractéristiques de qualité des pièces tournées.

I.4.1.Vitesse de coupe :

La vitesse de coupe est la vitesse relative entre l'arête de coupe de l'outil et la pièce à usiner. Elle est fonction de rotation de la pièce (n_r) et du diamètre D de la pièce (mm). Elle se note V_c et s'exprime en m/min :

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

V_c : vitesse de coupe (m/min).

D : diamètre de la pièce (mm).

N : vitesse rotationnelle (tr /min).

I.4.2.L'avance :

Dans le cas du tournage sur un tour, l'avance est la distance sur laquelle l'outil avance en un tour de la pièce.

Pour les outils à pointe unique l'avance est spécifiée en millimètres par tour, en millimètres par course, etc. Elle peut également être exprimée en millimètres par dent pour les fraises et les broches.

I.4.3.Profondeur de coupe :

La profondeur de coupe est la distance perpendiculaire mesurée entre la surface usinée et la surface non usinée de la pièce (Figure I.5).

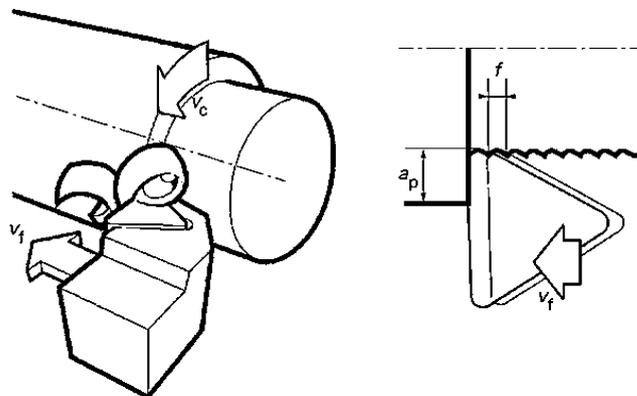


Figure I. 5 : Les paramètres de coupe[12].

La géométrie de la plaquette de coupe et la condition de lubrification sont des paramètres desquels on doit tenir compte.

I.5.Usure de l'outil :

L'usure de l'outil est le changement de forme de l'outil par rapport à sa forme originale, pendant la coupe, résultant de la perte graduelle de matière de l'outil ou de la déformation. La vitesse de déplacements relatifs, les contraintes et la température générée à la surface de contact dictent l'usure de l'outil et sont souvent décrites en termes de taux d'usure. L'usure de l'outil est un phénomène inévitable dans tous les processus d'usinage. Elle affecte négativement la productivité, la précision dimensionnelle, ainsi que la qualité du produit dans la plupart des processus d'usinage. Il est donc primordial de réduire l'usure des outils dans tout processus d'usinage.

Selon Yen et al.[13], quatre facteurs principaux affectent l'usure des outils, comme le montre la Figure (I.6). Premièrement, les propriétés physiques (par exemple, la dureté, la ductilité, la conductivité thermique) et la microstructure du matériau de la pièce à usiner qui affectent les forces de coupe et l'énergie impliquée dans l'action de coupe. Deuxièmement, le choix des paramètres de coupe et de l'alimentation en liquide de refroidissement/lubrifiant affecte la nature du contact à l'interface de l'outil et de la pièce et influence le coefficient de friction. Troisièmement, il y a l'effet de l'outil lui-même, comme le matériau de l'outil (substrat et revêtement) ainsi que sa conception géométrique, qui doit être choisis de manière appropriée en fonction de l'opération d'usinage spécifique. Enfin, la stabilité et la dynamique du système de la machine-outil jouent un rôle.

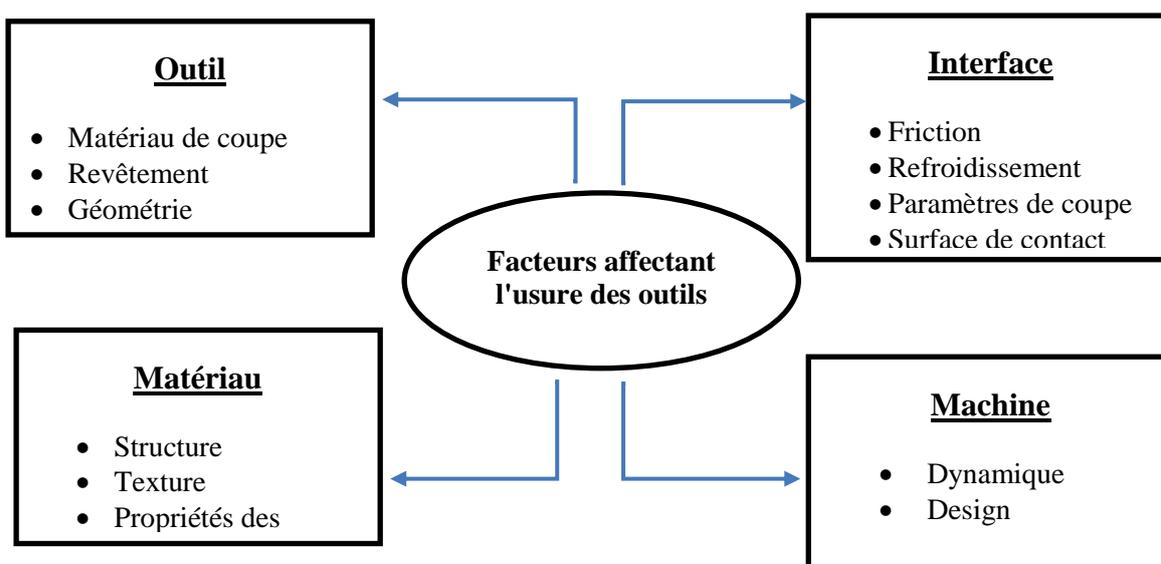


Figure I. 6 :Quatre facteurs influençant l'usure des outils [14].

I.5.1. Types d'usure des outils :

Selon la norme ISO 3685 :1993, il existe plusieurs types d'usure. Les types d'usure les plus importants sont l'usure en dépouille et l'usure des cratères. Les diverses formes de l'usure d'un outil de coupe sont schématisées ci-dessous (Figure I.7).

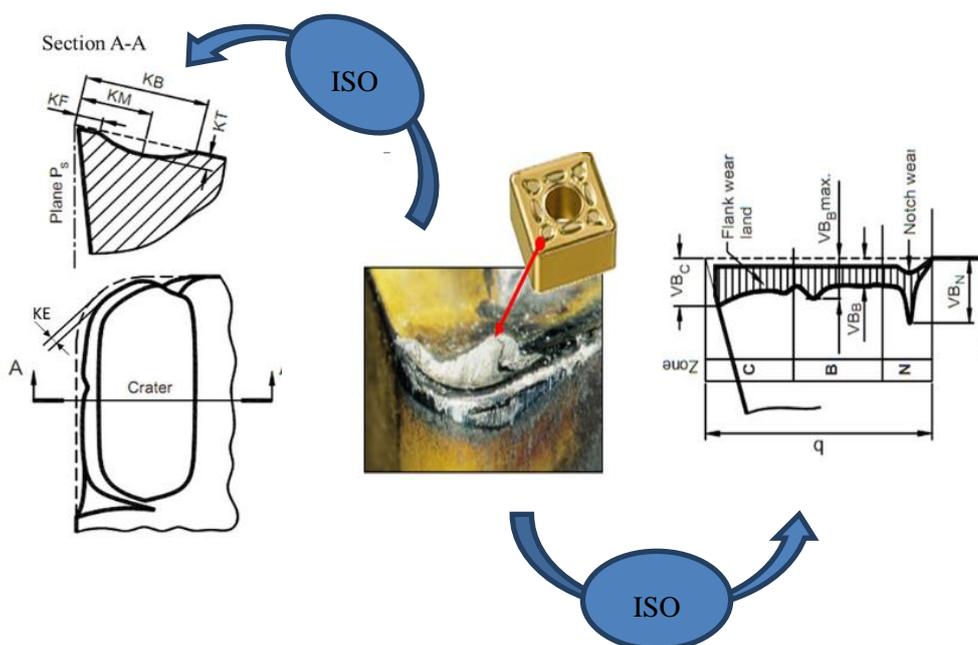


Figure I.7 : Schéma d'usure typique selon la norme ISO 3685 [15].

a) Usure en dépouille :

L'usure en dépouille apparaît sous la forme d'une zone d'usure sur la face de dépouille de l'outil (Figure **I.8**). L'usure en dépouille réduit l'angle de dépouille sur la face de dégagement de l'outil, augmentant ainsi la résistance au frottement[4]. Elle est principalement due à des mécanismes d'usure abrasive. Elle entraîne une réduction de la précision dimensionnelle et une mauvaise intégrité de la surface de la pièce usinée. Selon les normes ISO 3685 :1993, le critère de durée de vie de l'outil est fixé à 0,3 mm d'usure en dépouille. La Figure (**I.9**) montre la courbe caractéristique d'usure de l'outil.

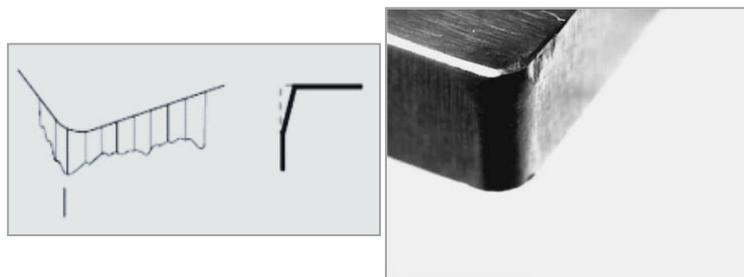


Figure I. 8: *Usure en dépouille* [16].

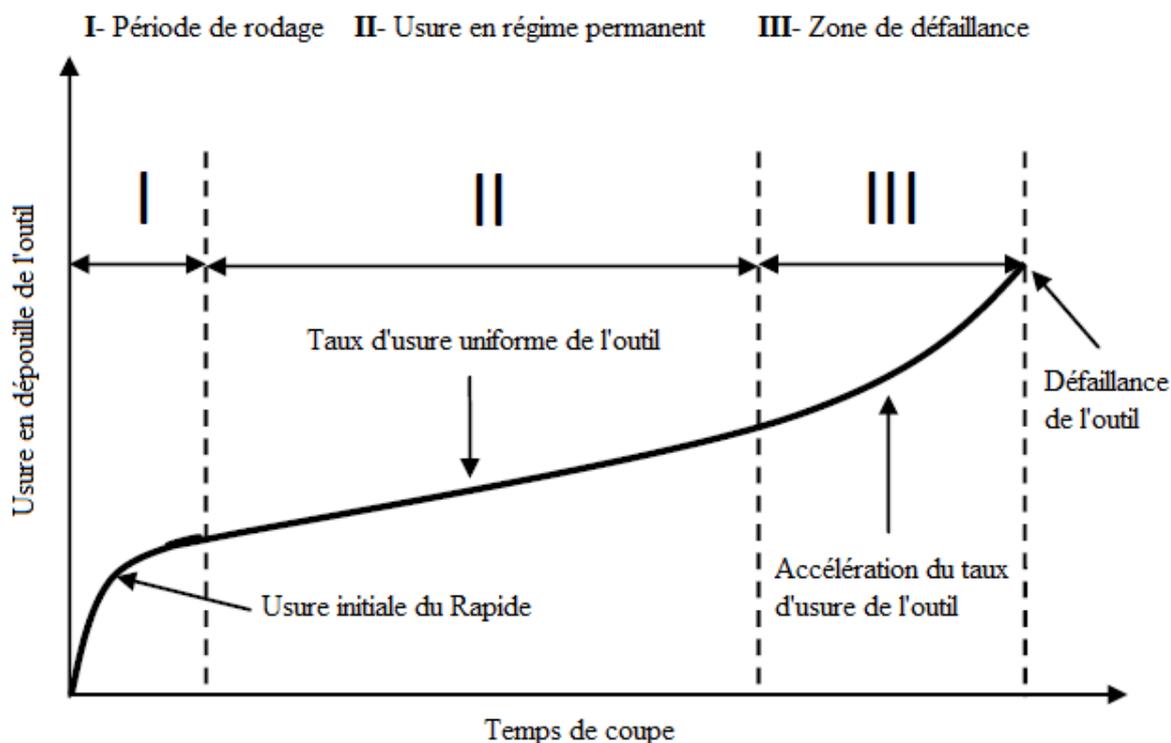


Figure I. 9: Stades typiques de l'usure en dépouille [17].

b) Usure en cratère :

L'usure en cratère est la conséquence du mouvement de collage et de glissement des copeaux lorsqu'ils passent sur la face de coupe de l'outil à haute température et sous forte contrainte (Figure I.10). L'usure par cratère diminue la résistance de l'arête de coupe, ce qui augmente la probabilité de rupture de l'outil

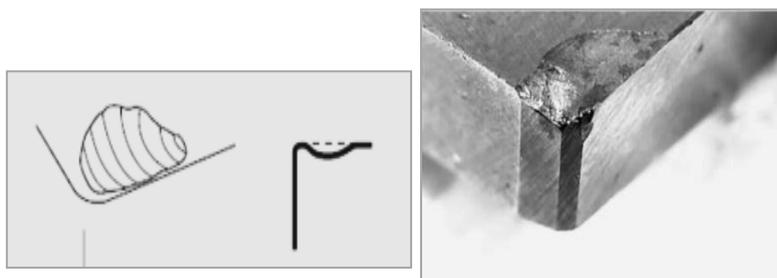


Figure I. 10: Usure en cratère [16].

Les mécanismes d'usure par diffusion, abrasion et adhésion déterminent généralement l'usure en cratère. Lors de l'évaluation de l'usure de la face de coupe, la profondeur du cratère, K_T , est le plus souvent utilisée.

c) Usure en entaille :

L'usure en entaille se produit lorsque la dépuille et la face de coupe de l'outil sont usées près du point où bec de coupe principale rencontre la pièce à usiner (Figure I.11). [18]. Cette usure est souvent associée à la profondeur de coupe choisie, qui détermine la largeur du copeau non coupé. L'encoche ou les stries présent sur le bec extérieur de la zone d'usure peut être causées par l'oxydation ou la présence de particules dures ou abrasives sur la pièce, ou encore par l'écaillage des surfaces usinées précédemment.

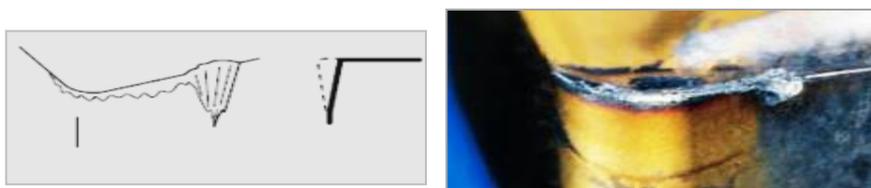


Figure I. 2 : Usure en entaille [19].

d) Arête rapportée :

L'arête rapportée désigne le matériau de la pièce qui se colle à l'arête de coupe de l'outil, altérant ainsi sa géométrie (Figure I.12), il n'est jamais complètement stable. Le matériau adhérent se détache lorsqu'il atteint une taille critique, entraînant souvent avec lui une partie du matériau de l'outil, ce qui provoque un écaillage de l'outil.

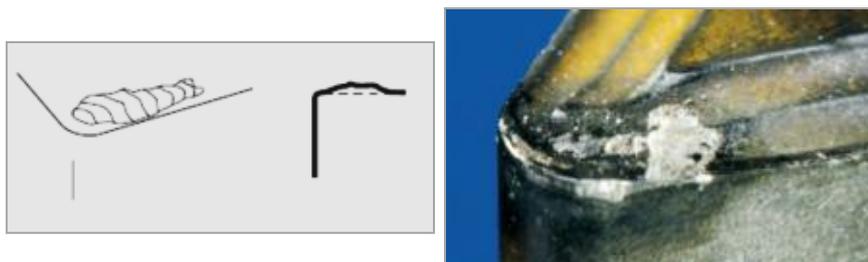


Figure I. 3 : Arête rapportée [19].

I.5.2.Mécanismes d'usure :

Tout au long du processus d'usinage, l'outil de coupe est exposé à des contraintes mécaniques et thermiques extrêmes, qui sont générées par la combinaison du matériau de la pièce et des conditions de coupe choisies pour effectuer l'usinage. Ces contraintes finissent par entraîner l'usure ou l'endommagement de l'outil.

L'usure est un phénomène progressif sur les surfaces de l'outil qui est causé par l'action de coupe et qui, avec le temps, modifie la forme de l'outil et donc sa géométrie d'origine, ce qui a un impact sur le processus d'usinage.

L'usure est le produit de différents mécanismes, où un mécanisme peut dominer sur un autre. L'usure dépend du matériau de la pièce et de l'outil, du processus d'usinage, des conditions de coupe, de la configuration de l'outil et du fluide de coupe appliqué pendant la coupe [20].

La section suivante présente un concept général des principaux mécanismes d'usure rencontrés au cours du processus d'usinage.

a) Abrasion :

L'usure par abrasion est l'une des principales causes d'endommagement de l'arête de l'outil de coupe. Elle peut affecter à la fois la face de coupe et la dépouille de l'outil. Toutefois, l'usure en dépouille est généralement la plus fréquente et la plus signalée. Elle se développe lorsque la surface de dégagement de l'outil frotte contre la pièce usinée au fil du temps. Quant à l'usure de la face de coupe, elle peut générer un cratère lorsque le copeau glisse sur la surface

de l'outil. Il est important de noter que l'usure par abrasion peut affecter la qualité de la pièce usinée et réduire la durée de vie de l'outil.

Le taux d'usure par abrasion est augmenté par la présence de particules dures dans le matériau de la pièce et par des températures de coupe élevées qui réduisent effectivement la dureté de l'outil de coupe. Par conséquent, les outils de coupe présentant des propriétés de dureté à chaud élevées offrent des niveaux plus élevés de résistance aux dommages causés par l'abrasion et, par conséquent, de meilleures performances. Souvent, des particules dures adhèrent à la surface de l'outil et sont entraînées le long de la face latérale lorsque l'outil de coupe glisse le long de la pièce. Dans ce cas, l'abrasion se produit généralement sur la face de dépouille de l'outil de coupe, comme le montre la Figure (I.13).

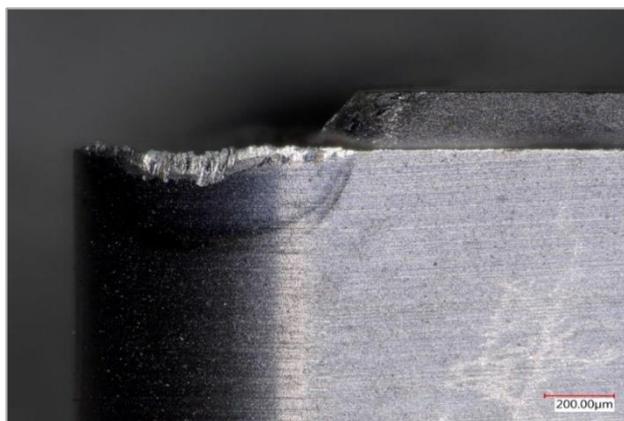


Figure I. 13: *Usure abrasive de l'outil en carbure*[10].

b) Adhésion :

L'usure par adhérence se produit lorsque des fragments de l'outil sont retirés de sa surface à une échelle microscopique. En raison de la température et des pressions élevées au niveau de l'arête de coupe, une liaison métallique se forme entre l'outil et le copeau, créant une zone de contact étroite et un flux de copeaux instable sur la face de coupe de l'outil. Ce phénomène conduit à la formation de l'arête rapportée. En augmentant la vitesse de coupe, l'écoulement des copeaux sur le BUE entraîne la rupture du matériau soudé, entraînant ainsi une partie du

matériau de l'outil par adhérence. Pour contrôler l'adhérence, l'utilisation d'un fluide de coupe est recommandée pour former un film entre les surfaces de contact[20]. La Figure (I.14) illustre le processus d'usure par adhérence.

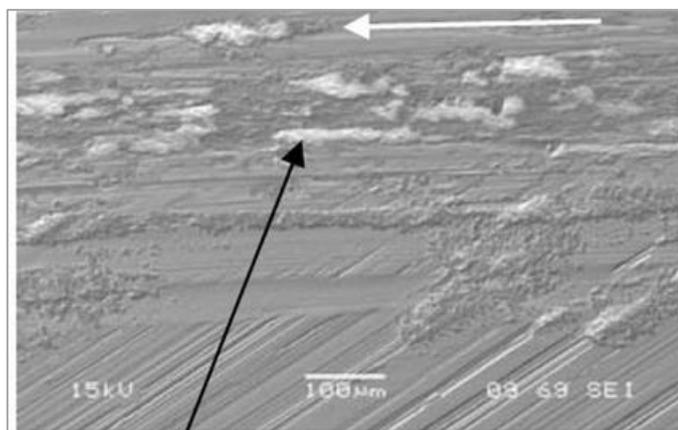


Figure I.14: *Usure adhésive* [21].

c) Diffusion :

Le processus de diffusion est un phénomène qui est activé dans la zone de coupe par la température. Ce phénomène est généralement caractéristique d'une opération de coupe à grande vitesse. En conséquence de ce processus, on observe une usure en cratère sur la face de coupe de l'outil. La Figure (I.15) montre un outil usé avec un motif d'usure typique qui est généré par la diffusion. La diffusion à l'état solide consiste à transférer les atomes d'un métal à un autre. La vitesse de diffusion dépend de la température des deux métaux concernés, de la durée du contact et de l'affinité physico-chimique entre les matériaux respectifs. Comme cela se fait au niveau atomique, les zones usées par diffusion ont un aspect lisse lorsqu'on les observe au microscope [6].

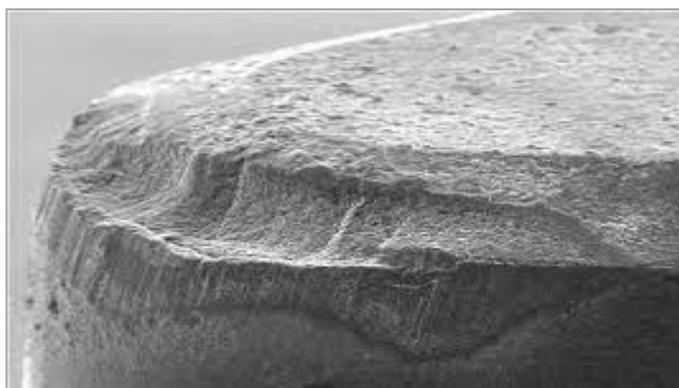


Figure I.15: *Diffusion* [6].

d) Oxydation :

Lorsque la surface de l'outil entre en contact avec l'oxygène à des températures élevées, une réaction chimique appelée oxydation se produit, formant une couche d'oxydes sur la surface de l'outil (voir Figure I.16) [10].

Le processus de formation et d'élimination de la couche d'oxyde est un phénomène répétitif qui peut se produire dans certaines conditions d'usinage. Dans certains cas, l'accumulation de cette couche fine peut même contribuer à réduire l'usure de l'outil en isolant l'outil et la pièce et en conférant à la zone de contact des propriétés uniques[24].

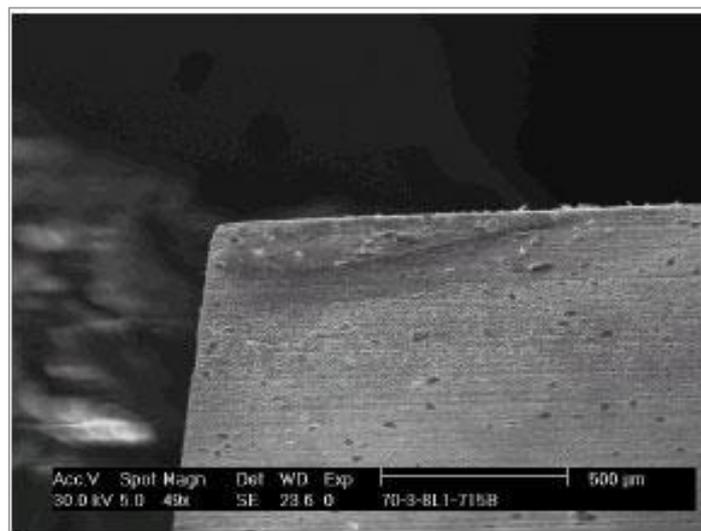


Figure I. 16:*Mécanisme de formation de l'oxydation* [23].

I.6.Revêtements :

I.6.1.Nécessité des revêtements et des techniques de revêtement :

L'usinage en général génère des températures élevées pendant la coupe. La chaleur générée est dissipée dans le copeau, l'outil et la pièce. Au fil des ans, des revêtements ont été appliqués sur les outils de coupe afin de réduire la friction entre les interfaces outil-copeau ou outil-pièce à usiner, minimisant ainsi la température de coupe. Il est important de comprendre comment les revêtements se comportent avec différentes combinaisons d'outils et de matériaux de travail, ainsi que l'effet qu'ils ont sur la génération de la température de coupe.

La Figure (I.17) illustre les influences que les revêtements peuvent avoir pendant la découpe. Les revêtements doivent donc être conçus de manière à pouvoir résister aux conditions d'usinage difficiles, à offrir une résistance à l'usure et à servir de barrière thermique.

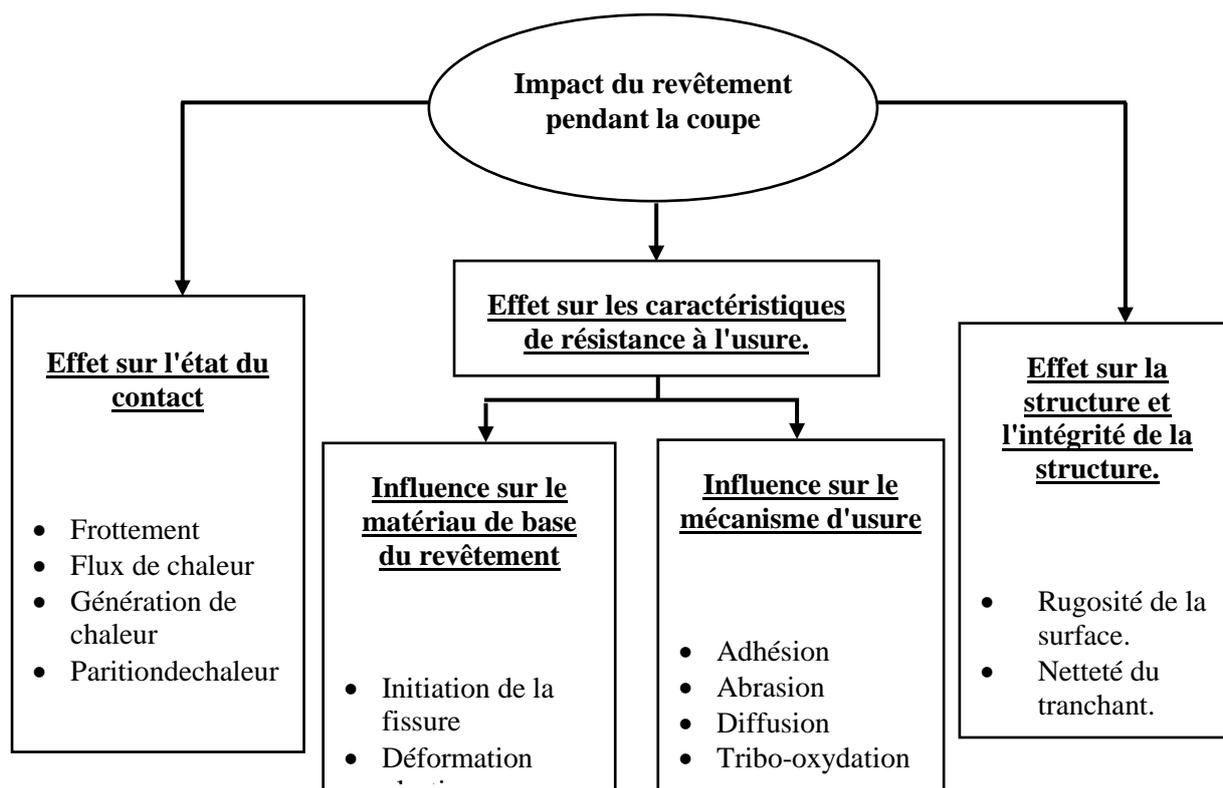


Figure I.17: Impacts du revêtement pendant la coupe [25].

I.6.2. Différents types de revêtements :

Plusieurs revêtements sont utilisés sur la surface des outils de coupe pour améliorer leurs performances d'usinage. En fonction de leur composition, de leur structure et de leurs performances, les revêtements peuvent être classés comme suit :

- Revêtement dur conventionnel
- Revêtement en alliage multi-composants
- Revêtement multicouche
- Revêtement super treillis
- Revêtement super dur
- Revêtement composite
- Revêtement souple

I.6.3. Technologies de revêtement : La méthode de dépôt en phase vapeur est largement utilisée pour déposer divers matériaux de revêtement sur la surface du substrat. Cette méthode de dépôt permet d'atteindre un haut degré d'uniformité et d'épaisseur de couche sur le substrat de l'outil.

Les principaux types de méthode de revêtement sont

Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

Dépôt physique en phase vapeur (PVD)

a) Dépôt chimique en phase vapeur :

Les carbures cémentés revêtus par CVD ont connu un énorme succès depuis leur introduction à la fin des années 1960 [27]. Depuis cette époque, les technologies de dépôt chimique en phase vapeur ont évolué d'une couche unique à des versions multicouches combinant TiN, TiCN, TiC et Al₂O₃ [28]. Les revêtements CVD modernes combinent des processus à haute et moyenne température dans des cycles complexes qui produisent d'excellents revêtements résistants à l'usure avec une épaisseur totale de 4-20 μm [29].

Cependant, la température élevée de dépôt (950-1059°C) pendant le CVD entraîne la diffusion d'éléments chimiques du substrat de carbure au revêtement pendant la croissance. L'effet principal est une fragilisation du revêtement [30]. En outre, le processus CVD entraîne une croissance plus rapide au niveau du bec de l'outil de coupe, ce qui permet d'obtenir une épaisseur de revêtement uniforme. Par conséquent, il y avait un fort désir de trouver des revêtements qui pourraient être déposés à des températures plus basses afin de permettre aux outils avec des becs plus tranchants d'être revêtus sans effet de fragilisation. La solution a été le PVD, où la température de dépôt peut être maintenue à environ 500 °C.

b) Dépôt physique en phase vapeur :

Les revêtements PVD, dont la température de dépôt se situe entre 400 et 600 °C, sont de plus en plus acceptés sur le marché. Au cours de la dernière décennie, ils ont été appliqués avec succès aux plaquettes de coupe en carbure. Ils offrent des avantages en termes de performances dans les applications impliquant des coupes interrompues, celles nécessitant des arêtes vives, ainsi que dans les applications de finition et autres [31]. Selon l'application visée, différentes technologies de dépôt physique en phase vapeur (PVD) telles que l'évaporation par faisceau d'électrons, la pulvérisation et l'évaporation à l'arc sont utilisées. Les améliorations apportées à ces technologies, telles que la pulvérisation magnétron à haute ionisation et les nouveaux procédés à arc cathodique, ont permis d'améliorer encore les performances des outils revêtus par PVD [32].

Le diagramme présenté dans la Figure (I.18) décrit le processus étape par étape impliqué dans le revêtement PVD. Il implique le transfert du matériau cible (transfert d'atome à atome) de l'état solide à l'état de vapeur et de nouveau à l'état solide par condensation, déposant ainsi progressivement un film mince sur la surface du substrat. Les revêtements PVD présentent généralement une dureté, une résistance à l'usure et un coefficient de frottement réduits. La principale limite des revêtements PVD est le coût élevé de l'investissement pour un faible taux de dépôt, ce qui les rend peu rentables en termes d'argent et de temps.

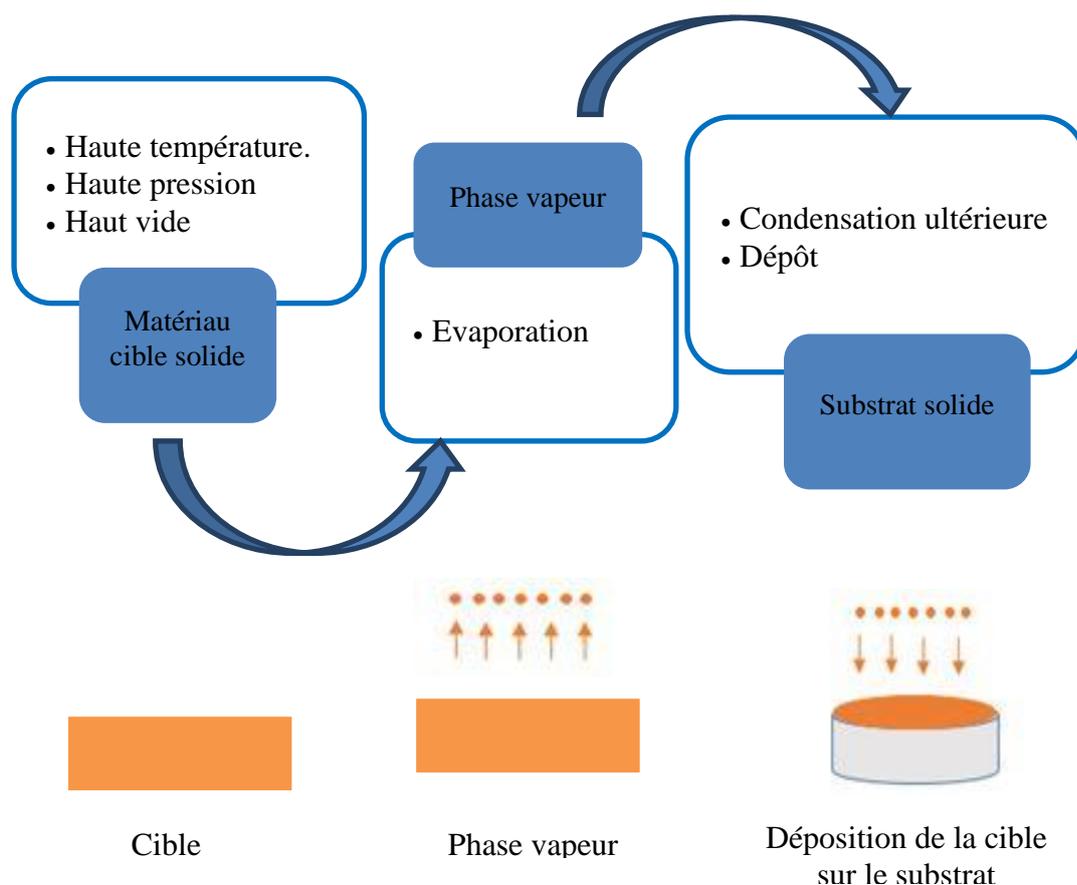


Figure I.18: Étapes du dépôt d'un revêtement par PVD [33].

Les performances de coupe des outils à revêtement PVD dépendent fortement de la composition, de la microstructure, des contraintes internes et de l'adhérence du revêtement au substrat, ainsi que de la composition du substrat et de la géométrie de l'outil [34]. La chaîne des procédés PVD comprend des procédés de prétraitement et des procédés post-PVD. Les procédés de prétraitement tels que la gravure au plasma et la gravure chimique influencent l'adhérence, la croissance des grains, les contraintes à la surface du substrat et la structure du revêtement, tandis que les procédés post-PVD influencent le lissage de la surface du revêtement et un meilleur écoulement des copeaux [35].

Les revêtements PVD attribuent d'excellentes performances de coupe aux plaquettes en carbure cémenté [36]. La raison pour laquelle le PVD a pris de plus en plus d'importance dans le dépôt de nombreux revêtements est que les températures de revêtement plus basses offrent des avantages en matière de micro-dureté.

I.7.Intégrité de la surface :

L'intégrité de la surface est un aspect crucial pour évaluer la qualité de la surface usinée. Elle englobe différents aspects tels que les dommages sub-superficiels, les textures et les contraintes résiduelles, qui peuvent influencer les propriétés fonctionnelles de la surface. En revanche, la rugosité de surface ne représente que la variation des hauteurs de la surface. Bien que la rugosité soit un paramètre important pour décrire la texture de la surface, elle ne fournit pas une indication complète de l'intégrité de la surface. En somme, l'intégrité de la surface englobe la topographie, mais également d'autres aspects critiques qui peuvent affecter les performances de la surface usinée.

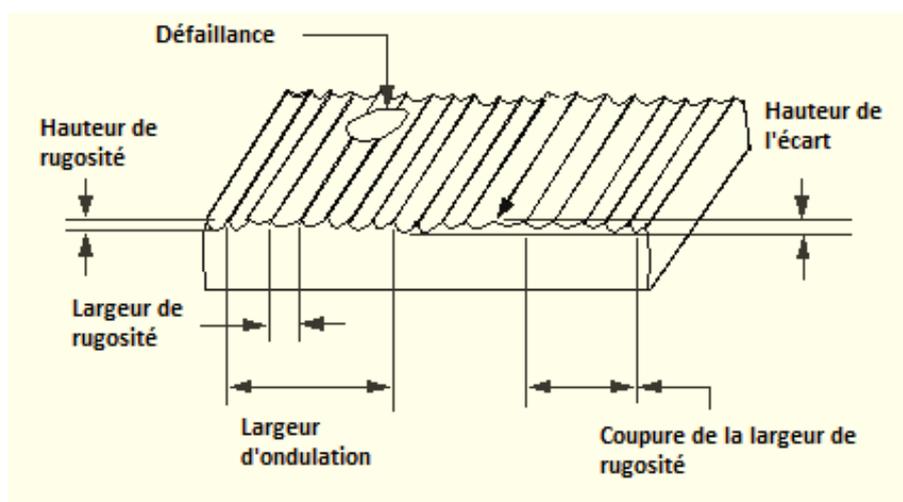


Figure I. 19: topographie de surface [40].

La Figure (I.19) illustre les topographies de la surface usinée. Les caractéristiques importantes de la topographie de la surface sont la texture de la surface, les couches, les ondulations et la rugosité, qui sont en contact direct avec l'environnement.

I.7.1.Paramètres d'état de surface :

Nombreux sont les normes et les paramètres pour qualifier la rugosité de surface .On se limite donc à présenter les paramètres de surface couramment utilisés dans le domaine de la fabrication mécanique, définis selon la norme **ISO 4287**(Figure I.20).

- Moyenne de la ligne centrale (R_a)

- Carré moyen du parcours (R_q)
- Hauteur maximale du profil (R_t)
- Moyenne sur dix points (R_z)
- La hauteur de crête R_p

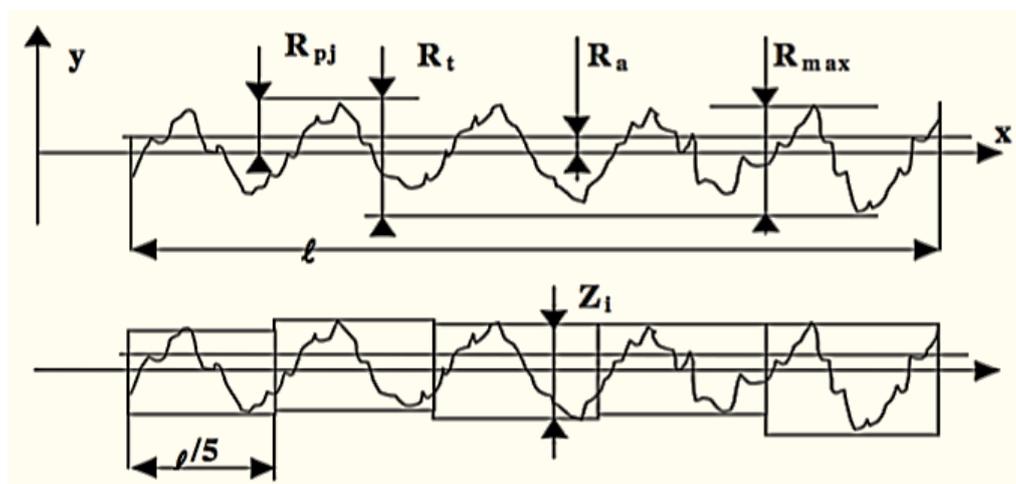


Figure I. 20: Critères de rugosité [41].

I.7.1.1.Écart moyen arithmétique (R_a) :

Elle est calculée comme la moyenne de toutes les différences verticales par rapport à la surface nominale pour une longueur définie d'échantillonnage. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i| \quad (I.3)$$

Avec :

n : nombre de composantes.

Y_i : déviations du profil d'évaluation.

I.7.1.2.Méthode du carré moyen de la route (R_q) :

Elle est calculée comme la moyenne quadratique des vallées et des pics évalués à partir de la surface nominale. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2}$$

Avec :

(I.4)

Y_i : carrés des déviations.

n : nombre de composantes.

I.7.1.3.La hauteur de crête (R_p) :

La hauteur maximale de la crête du profil R_p est la valeur moyenne des hauteurs de crêtes des cinq longueurs de référence du profil obtenues. Le paramètre de rugosité de surface R_p associé à R_z peut fournir des informations sur les caractéristiques de surface.

I.7.1.4.Hauteur maximale du profil (R_t) :

La hauteur maximale du profil est déterminée en mesurant la différence entre la hauteur maximale du pic et la hauteur maximale de la vallée.

$$R_t = R_p - R_v$$

Avec :

(I.5)

R_p : la hauteur maximale du pic.

R_v : la hauteur maximale de la vallée.

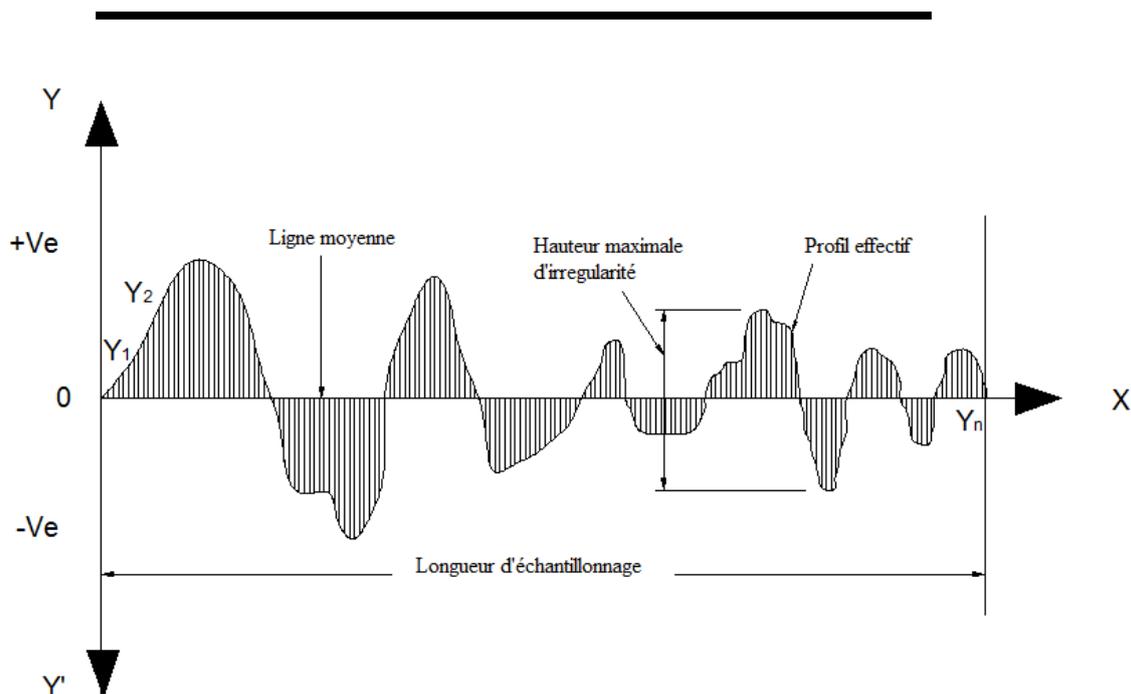


Figure I. 21: Hauteur maximale de l'irrégularité[2].

I.7.1.5. Hauteur de dix points d'irrégularités (R_z) :

C'est la mesure des déviations de la hauteur moyenne et du pic le plus bas dans une longueur donnée. Elle est calculée par l'équation suivante :

$$R_z = \frac{(R1 + R3 + R5 + R7 + R9) - (R2 + R4 + R6 + R8 + R10)}{5} \quad (\text{I.6})$$

Où R1, 3, 5, 7,9 sont les hauteurs mesurées des pics et R2, 4, 6, 8,10 sont les hauteurs mesurées des vallées par rapport aux données de référence.

Les détails de la hauteur des irrégularités en dix points sont présentés dans la Figure(I.22).

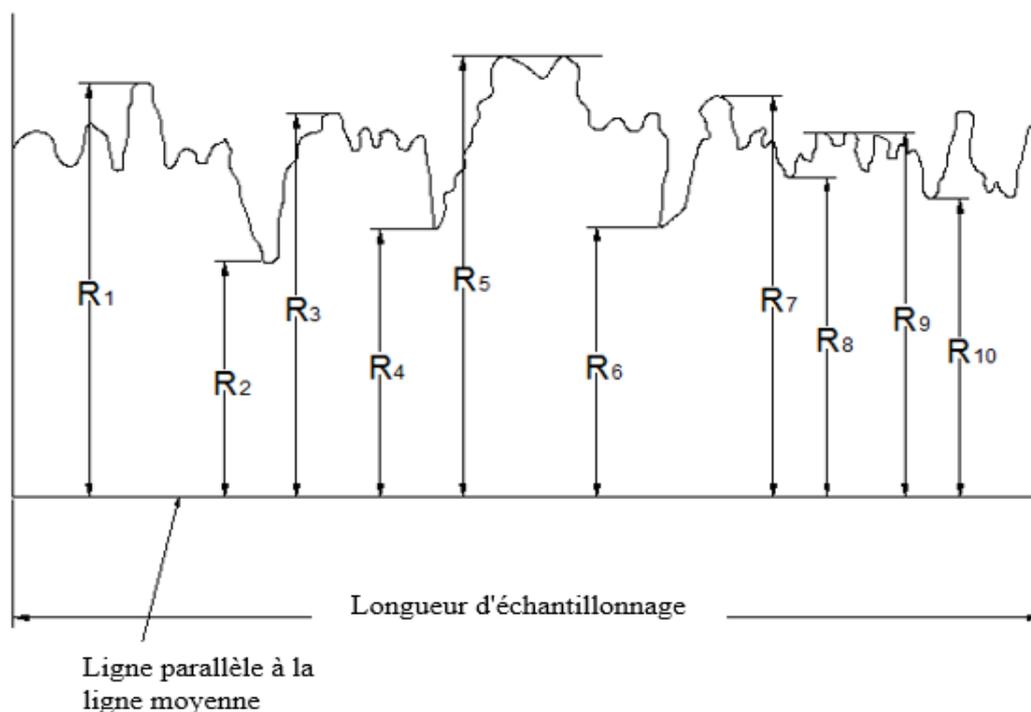


Figure I. 22: Hauteur en dix points des irrégularités [2].

I.8. Les fontes :

I.8.1 Définition :

La fonte est l'un des plus anciens métaux ferreux à usage commercial. Il est principalement composé de fer (Fe), de carbone (C) et du silicium (Si), mais peut également contenir des traces de soufre (S), de manganèse (Mn) et de phosphore (P). Il a une teneur en carbone relativement élevée de 2% à 5% (Figure I.23). Il est généralement cassant et non malléable (c'est-à-dire qu'il ne peut pas être plié, étiré ou martelé en forme) et relativement faible en tension. Les éléments en fonte se rompent sous charge de traction excessive avec peu de distorsion préalable. La fonte, cependant, a une excellente résistance à la compression et est couramment utilisée pour les structures qui nécessitent cette propriété, ainsi que pour les conduites d'eau et d'égout. La composition de la fonte et la méthode de fabrication sont essentielles pour déterminer ses caractéristiques. [42]

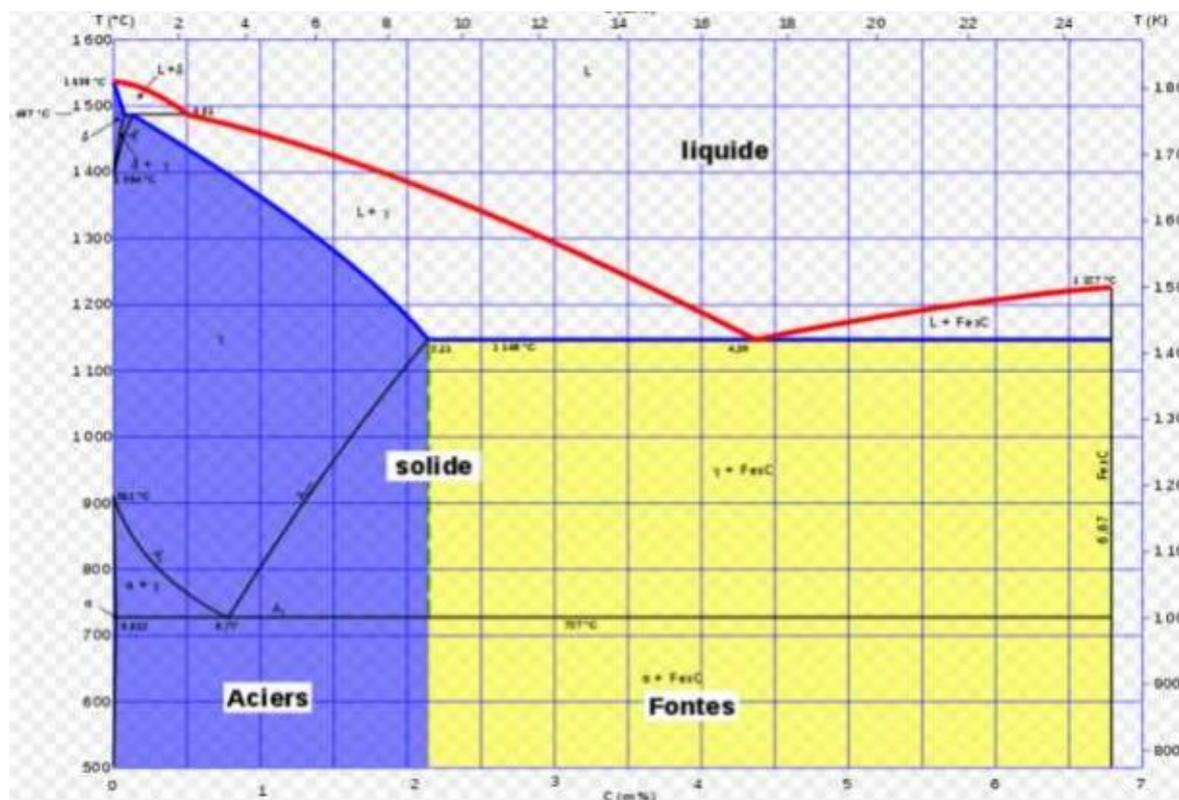


Figure I.23 : Diagramme fer-carbone[40].

I.8.2. Classification des fontes :

Plusieurs classifications des fontes existent, mais la plus utilisée, basée sur le faciès de rupture d'un témoin, définit deux catégories : les fontes blanches, à cassure blanche, constituées de fer et de cémentite et les fontes grises, à cassure grise, constituées de fer et de graphite. Les fontes sont toutes des alliages. Elles se distinguent des autres alliages par leur excellente coulabilité. La fonte a une température de fusion allant de 1 135 °C à 1 350 °C, essentiellement en fonction du pourcentage de carbone et de silicium qu'elle contient. Lorsqu'elle est en fusion, sa teneur maximale en carbone dépend de sa température. Au moment de la solidification, la quantité de carbone précipitant sous la forme de graphite dans la matrice métallique dépend des autres éléments présents (essentiellement le silicium) et des vitesses de refroidissement.[43]

I.8.2.1. Fontes grises :

Cette famille de fonte est caractérisée par son carbone sous forme de graphite. La structure graphitique du carbone est obtenue par un refroidissement très lent de la fonte, d'autres éléments d'addition permettent la mise en forme structurelle du graphite (magnésium pour précipiter sous forme de nodules par exemple) [44].

I.8.2.2. Fonte à graphite sphéroïdal :

La fonte ductile, également connue sous le nom de fonte nodulaire ou fonte à graphite sphéroïdal (GS), est très similaire en composition à la fonte grise, mais le graphite libre dans ces pièces moulées précipite à partir des particules sphériques de fusion plutôt que des flocons. Ceci est accompli grâce à l'ajout de petites quantités de magnésium ou de cérium à la poche ou aux moules juste avant de verser. Les particules sphériques de graphite ne forment pas un réseau continu semblable à une fissure dans la matrice comme le graphite flocons, résultant en une résistance et une ténacité plus élevées par rapport à la fonte grise de composition similaire.[45]

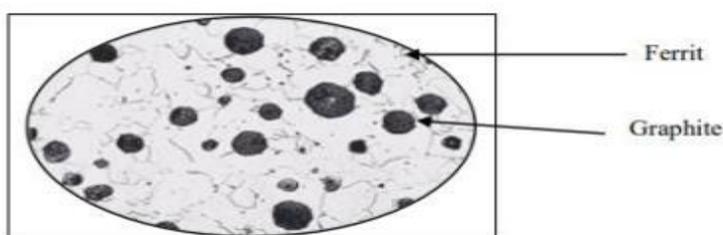


Figure I.24 : Micrographie de fonte à graphite Sphéroïdal [46].

I.8.2.3. Fontes grises à graphite lamellaire :

Lorsque la composition de la fonte liquide et sa vitesse de refroidissement sont appropriées, le carbone précipite au cours de la solidification sous la forme de lamelles de graphite séparées. Les feuillet de graphite croissent par leur tranche au sein du liquide et donnent ainsi naissance à la forme en lamelles caractéristique de ces fontes. Les caractéristiques de

ces fontes dépendent de la dimension moyenne, du nombre et de la répartition des lamelles de graphite, ainsi que de la dureté relative du métal de la matrice. Ces facteurs sont arrangés principalement par les teneurs en carbone et en silicium du métal et par la vitesse de refroidissement de la pièce moulée [47].

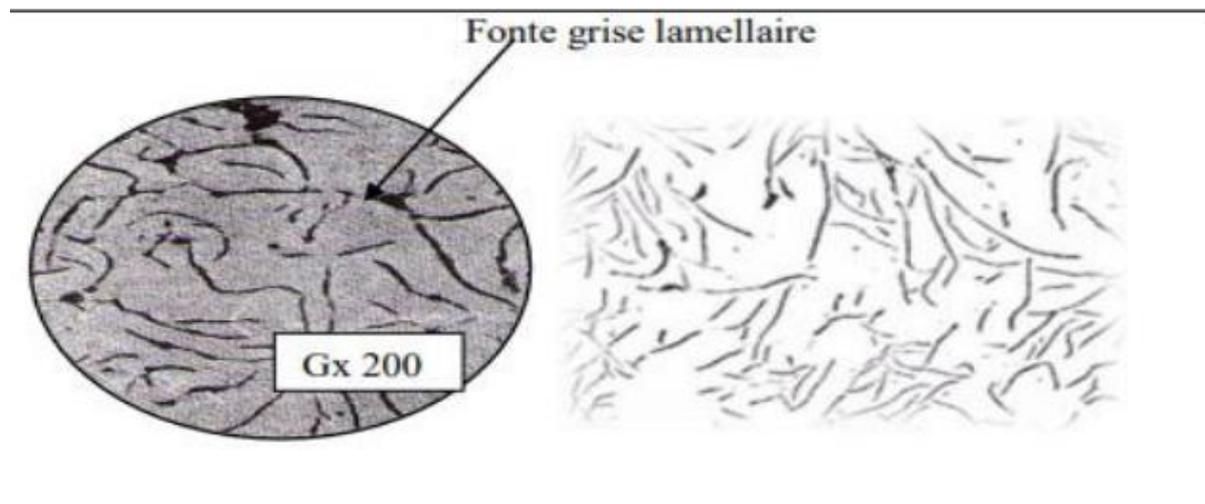


Figure I.25 : Fonte grise lamellaire [46].

I.8.2.4 fontes blanches :

Les fontes blanches sont dures et cassantes, et ne peuvent pas être usinées facilement. La fonte blanche est le seul membre de la famille des fontes où le carbone est présent uniquement sous forme de carbures. En raison de l'absence de graphite, elle présente un aspect clair. La présence de différents carbures rend les fontes blanches extrêmement dures et résistantes à l'abrasion, mais aussi très cassantes. La microstructure de la fonte blanche contient de la cémentite massive (blanche) et de la perlite. La fonte blanche tire son nom de la surface de rupture blanche et cristalline observée lorsqu'une pièce se brise. La plupart des fontes blanches contiennent moins de 4,3 % de carbone, avec de faibles teneurs en silicium pour empêcher la précipitation du carbone sous forme de graphite. Elle est utilisée dans des applications où la résistance à l'abrasion est importante et où la ductilité n'est pas requise, comme les revêtements de malaxeurs à ciment, les broyeurs à boulets, certains types de filières de tréfilage et les buses d'extrusion. La fonte blanche est généralement considérée

comme non soudable. L'absence de ductilité pouvant absorber les contraintes induites par le soudage dans le métal de base et la zone affectée par la chaleur adjacente à la soudure provoque des fissures pendant le refroidissement après le soudage [48].

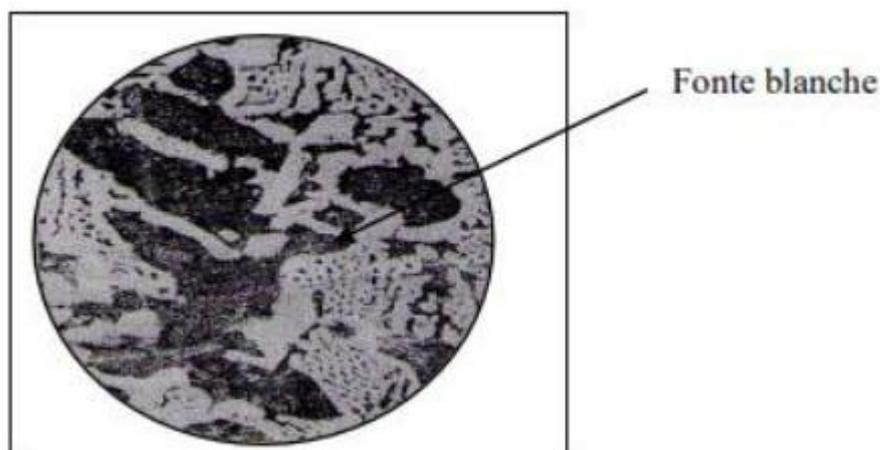


Figure I .26:Fonte blanche hypo eutectique [49].

I.8.2.5.Fonte malléable :

Les fontes malléables sont une catégorie de fontes dont les propriétés mécaniques se situent entre celles des fontes grises et des fontes ductiles. La microstructure confère aux fontes malléables des propriétés qui les rendent idéales pour des applications nécessitant de la résistance et de l'usinabilité, ainsi que pour des composants devant présenter une certaine ductilité ou malléabilité afin de pouvoir être pliés ou fléchis sans se fissurer. Elles sont souvent utilisées comme matériau de choix pour de petites pièces moulées ou des pièces moulées de faible épaisseur qui, dans d'autres types de fonte, auraient tendance à présenter une couche dure à la surface due aux taux de refroidissement rapides dans les sections minces [50].



Figure I.27 : Microstructure de la fonte malléable [51].

I.9.conclusion :

Ce chapitre donne une brève introduction aux outils de coupe, les différentes méthodes de revêtement, en soulignant l'importance des études d'usinabilité, de la qualité de la surface usinée et de l'usure des outils. La dernière partie de cette étude bibliographique est consacrée aux travaux de recherche dans le domaine du tournage, avec un accent particulier sur la modélisation des paramètres technologiques d'usinage et l'optimisation des conditions de coupe. Cette étude nous a permis de comprendre les phénomènes physiques liés au processus de coupe ,ainsi que les méthodes de pointe utilisées pour optimiser les conditions de coupe.

Chapitre II: Procédures expérimentales

Chapitre II

Procédures expérimentales

Sommaire

II.1. Introduction :	40
II.2. Equipements utilisés :	40
II.2.1. Éprouvettes :	40
II.2.2. Préparation de l'éprouvette :	41
II.2.3. Machine-outil :	42
II.2.4. Plaquettes de coupe :	43
<i>a) Plaquette en céramique revêtue CC1690 :</i>	43
<i>B)Plaquette en céramique non revêtue CC6090 :</i>	43
II.2.5. Porte-outils :	44
II.2.6. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe :	45
II.2.7. Mesure de la rugosité de surface :	46
II.2.7.1. Rugosité 2D :	46
II.2.7.2. Rugosité 3D :	47
II.2.8. Microscope optique pour la quantification de l'usure :	49
II.2.9. Microscopie Électronique à Balayage :	50
II.2.10. Diffraction des rayons X :	50
II.3. Conclusion :	51

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons la procédure suivie ainsi que les équipements utilisés pour l'élaboration des expériences. Les essais de chariotage réalisés sur la EN-GJL-250, nécessaires à la réalisation de notre travail, ont été effectués à l'atelier de l'usinage au sein du centre de recherche en mécanique (CRM-Constantine). Les analyses de MEB, EDS et Drx ont été faites au Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico-Chimiques (CRAPC)-PTAPC Laghouat.

II.2. Équipements utilisés :

II.2.1. Éprouvettes :

Les opérations de chariotage relatives aux essais de la rugosité, effort de coupe et usure en dépouille ont été réalisés sur des éprouvettes en fonte de nuance EN-GJL-250, de 70-90 mm de diamètre et de 400 mm de longueur (Figure II.1). Cette fonte est largement utilisée dans l'industrie et notamment dans l'automobile (disques de frein), la construction mécanique (convoyeurs, pompes et pignons) et la tuyauterie. Ses principaux avantages sont son excellente coulabilité et usinabilité, sa bonne résistance à l'usure et sa grande capacité d'amortissement des vibrations. Cette fonte présente une dureté de 250 HB et une limite d'élasticité de 250 MPa. La composition chimique réelle de la fonte FGL250 est indiquée au tableau II.1.

Tableau II.1 : Composition chimique de la fonte FGL 250

Éléments	Pourcentages
Carbone	4%
Silicium	2.1%
Manganèse	0.76%
Phosphore	0,11%
Nickel	0.03%
Cuivre	0.28%
Chrome	0.13%
Fer	92.35%
Cobalt	0.003%
Titane	0.015

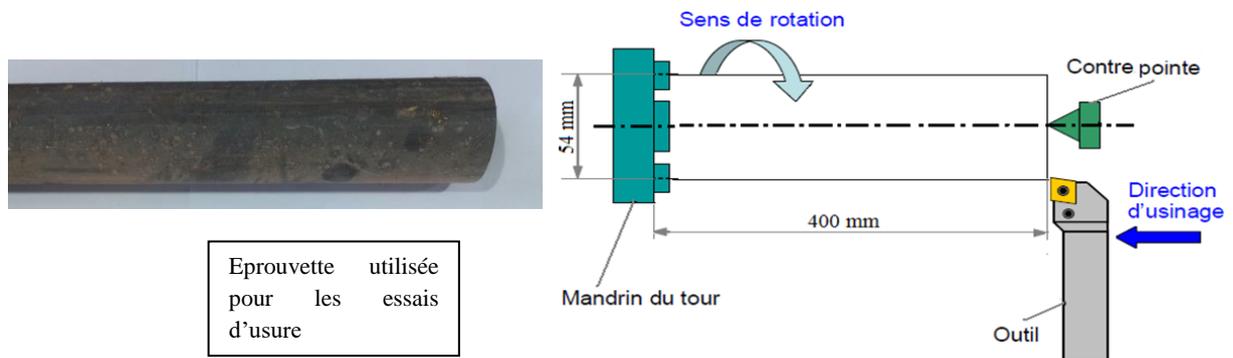


Figure II.1 : Epreuves en EN-GJL-250 utilisées.

II.2.2. Préparation de l'éprouvette :

Avant de commencer à effectuer les opérations de coupe relatives aux essais d'usure, efforts de coupe et rugosité de surface, nous devons préparer l'éprouvette en proportion de ces expériences. Premièrement nous avons réalisé un trou de centrage sur l'éprouvette afin de la fixer par le contre point pour éliminer les vibrations à cause de la longueur importante de la pièce (400 mm). Ensuite, nous avons fait un chariotage le long de la pièce afin d'assurer sa coaxialité.



Figure II.2 : Chariotage de l'éprouvette

II.2.3. Machine-outil :

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de marque Turnado (Figure.II.3). Les caractéristiques de cette machine sont présentées dans le tableau II.2



Figure II.3 : Tour parallèle Turnado 230/1500 V.

Tableau II.2 : Caractéristiques de la machine-outil.

Langueur de pièce	1500 mm
Langueur rompu	155 mm
Langueur banc	300 mm
Diamètre usinable sur banc	460 mm
Diamètre usinable sur chariot	224 mm
Diamètre usinable sur la banc	690 mm
Puissance moteur principale	7.5 Kw
Tension	400 V
Poids	1.970 Kg
Avance axe X	0.014 – 0.784 mm/tr
Avance axe Z	0.031 – 1.7 mm/tr
Course axe X	285 mm
Course axe Z	128 mm
Passage de broche	58 mm

Vitesse de broche	L 30 – 600/ H600 – 3000 1/ min
-------------------	--------------------------------

II.2.4. Plaquettes de coupe :

Toutes les opérations d'usinage ont été faites par deux plaquettes de coupe en céramique en nitrure de silicium revêtue (CC1690) et non revêtue (CC6090). Ces dernières sont amovibles, de forme carrée et chacune d'elles possède huit arêtes de coupe. Elles se fixent mécaniquement par bride. La figure II.3 illustre la forme géométriques des plaquettes de coupe utilisées.

a) Plaquette en céramique revêtue CC1690 :

Est un substrat de nitrure de silicium avec un revêtement de nitrure de titane. Les propriétés de CC1690 en font le produit idéal pour les applications d'ébauche et de finition dans la fonte principalement pour la fonte grise. Devrait être utilisé pour des composantes telles que les disques de frein, les composantes de pompe, les vannes industrielles et les pièces automobiles.

B) Plaquette en céramique non revêtue CC6090 :

Est nuance de céramique en nitrure de silicium (Si_3Ni_4) a une résistance à l'usure améliorée et un comportement à la ténacité accrue, surpasse les autres nuances dans les applications de fonte actuellement sur le marché. Recommandé pour l'ébauche à grande vitesse jusqu'à la finition des fontes.

Les caractéristiques techniques de ces plaquettes sont mentionnées dans le tableau II.3.

Tableau II.3 : Caractéristiques techniques de la plaquette utilisée.

Désignation	SNGA12-04-08
Marque	SANDVIK
Type d'usinage	Finition et semi finition
Matière	Céramique
Epaisseur de plaquette	4mm
Rayon de plaquette	0.8 mm
Longueur de l'arête de coupe	12 mm
Nombre d'arêtes de coupe	8
Type de plaquette	Négative
Revêtement	CVD TiAlN
Nuance	CC1690 et CC6090

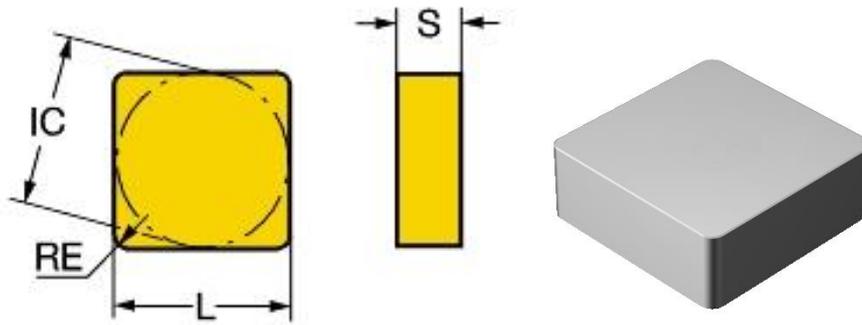


Figure II.4 : forme géométrique des Plaquettes de coupe utilisées [52].

II.2.5. Porte-outils :

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte-outil sur lequel se fixent les plaquettes mécaniquement par bride de serrage. Les caractéristiques de ce porte-outil sont indiquées dans le tableau II.4. et figure II.4.

Tableau II.4 : dimensions du porte-outil utilisé.

Désignation	CSDNN25x25M12
Marque	SANDVIK
Angle de l'arête de coupe de l'outil(KAPR1)	45°
Angle d'attaque de l'outil(PSIR)	45°
Porte-à-faux maximal(OHX)	36.5 mm
Longueur fonctionnelle(LF)	150 mm
Largeur fonctionnelle(WF)	12.8 mm
Largeur de queue(B)	25 mm
Hauteur de queue(H)	25 mm

La figure II.4 et le tableau II.5 présentent les dimensions du porte-outil utilisé.

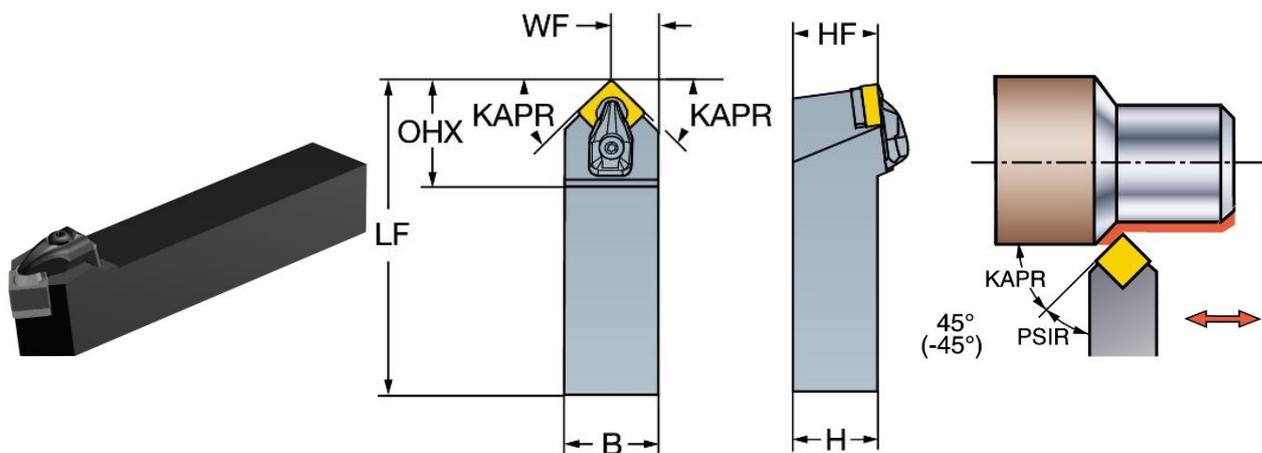


Figure II.5 : Porte-outil utilisé.

II.2.6. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe :

Les composantes de la force de coupe ont été mesurées pendant les opérations d'usinage par un dynamomètre à quartz standard (KISTLER 9257B) qui permet des mesures de -5kN à 5kN. La Figure (II.6a) illustre le dynamomètre de force de coupe utilisé. Le dispositif de mesure comprend un amplificateur de charge (KISTLER 5019B130), un système d'acquisition de données (A/D 2855A3) et un dispositif de programmation graphique (DYNOWARE 2825A1-1) pour l'analyse et la visualisation des données (Figure. II.6b). Le signal de force acquis a été analysé pour un temps de coupe de 5 secondes et une vitesse d'acquisition de 500 Hz.

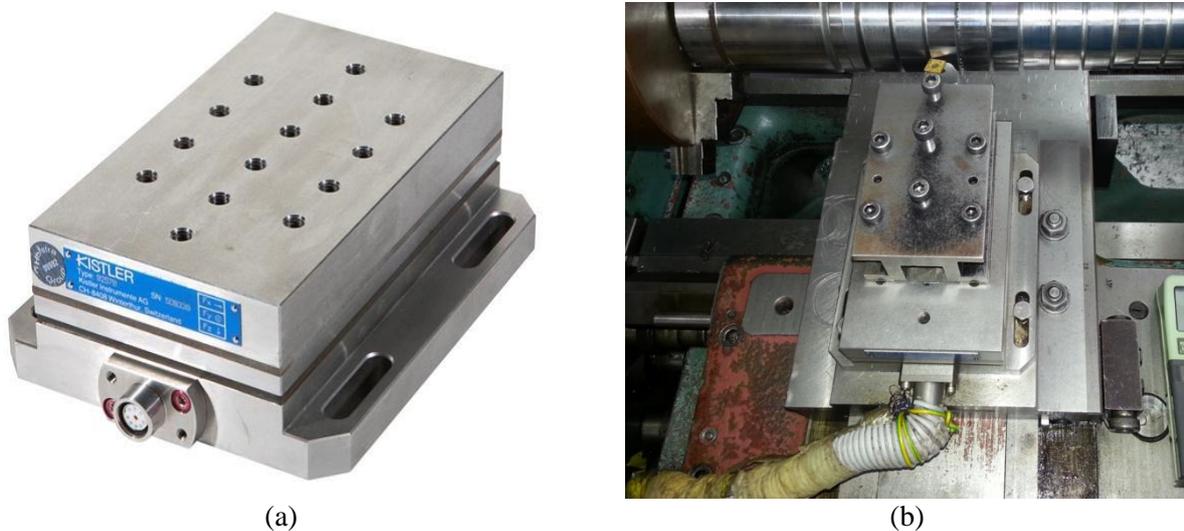


Figure II.6: (a) Dynamomètre à quartz standard (KISTLER 9257B), (b) Position du dynamomètre d'effort de coupe.[53]

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil a le mouvement de translation. Ce dernier est monté sur la plate-forme, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation (Figure II.6b). La plate-forme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure.

Les réactions qui agissent sur cette plaque lors de l'opération d'usinage sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des charges. Ensuite, l'acquisition de ces dernières est assurée par le PC (DYNOWARE) qui analyse, traite et converti ces charges en signaux, exprimant ainsi les forces produites lors du processus du tournage en trois composantes F_a , F_r et F_z . (Voir Figure II.7) [54].

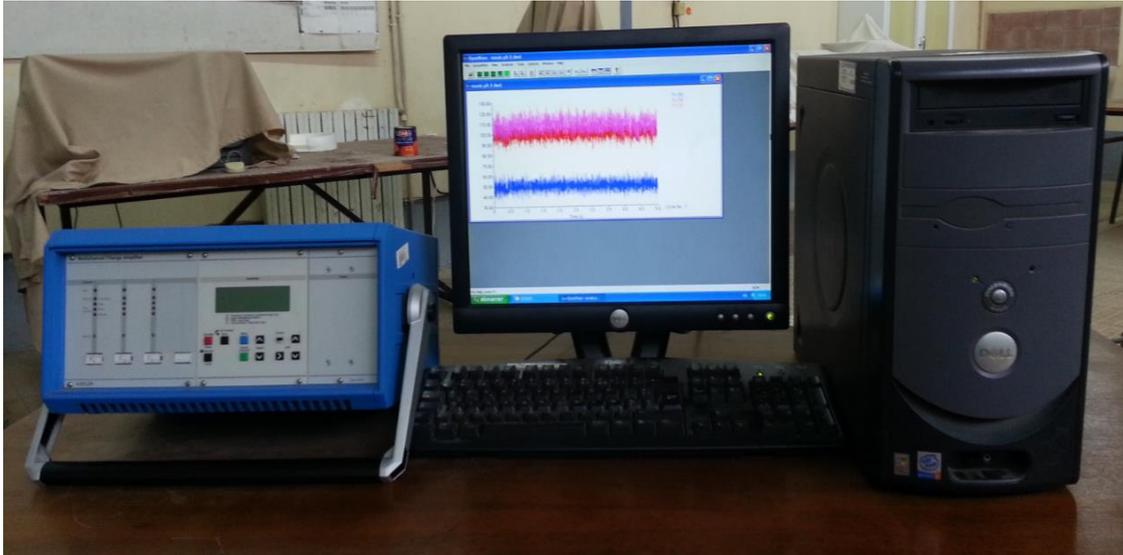


Figure II. 7 : Amplificateur de charge (KISTLER 5019B130) & dispositif de programmation graphique (DYNOWARE 2825A1-1)

La Figure (II.8) présente un exemple d'acquisition du logiciel qui montre les profils de trois composants de l'effort de coupe (effort axial, effort radial et effort tangentiel) [55].

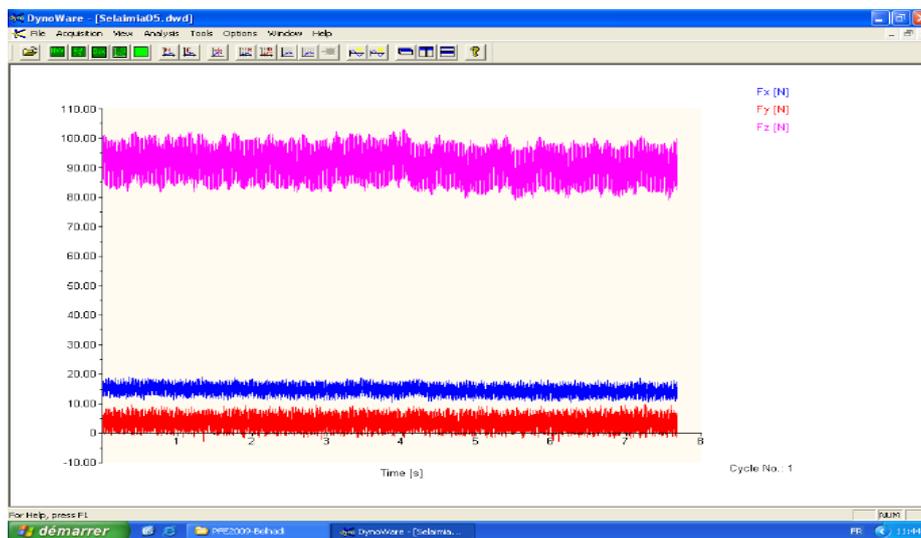


Figure II.8 : Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE.

II.2.7. Mesure de la rugosité de surface :

II.2.7.1. Rugosité 2D :

Pour la mesure de critère de rugosité de surface R_a nous avons utilisé un rugosimètre SURFACE ROUGHNESS TESTER (PCE_RT1200) (Figure II.9) et. Ce dernier est constitué

d'un point de diamant (palpeur) avec un rayon de pointe de (μm) se déplaçant linéairement sur la surface mesurée, la longueur de palpage est de 2.5mm avec une longueur de base de 0.8mm. Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la même machine et sans démontage de la pièce (Figure II.10).



Figure II.9: ROUGHNESS tester (PCE-RT1200).



Figure II.10 : Mesure de la rugosité sans démontage de la pièce.

Les différentes vitesses de palpeur en fonction des longueurs mesurées sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II.5 : Vitesse de palpeur et longueurs de mesure.

Niveau	Vitesse de d'avance du palpeur (mm/s)	Longueur mesurée (mm)
1	0.135	0.25
2	0.5	0.8
3	1	2.5

II.2.7.2. Rugosité 3D :

Plusieurs mesures ont été établies sur la plate-forme 3D de métrologie optique modulaire AltiSurf-500 (Figure II.11). Cet appareil permet la caractérisation de surface 2D et 3D, l'analyse de rugosité 2D, analyse de forme et mesure de distance. Dans notre étude on s'intéresse seulement à l'analyse 2D et 3D.

L'appareil AltiSurf-500 est doté de plusieurs tables de déplacement motorisées de haute précision qui permettent un mouvement fluide de l'échantillon selon les axes X et Y, ainsi que selon un ou plusieurs axes rotatifs, si nécessaire. De plus, il dispose d'une plateforme

rectangulaire spécialement conçue pour supporter l'échantillon à mesurer. Cette conception garantit une grande stabilité et une précision accrue lors des mesures.



Figure II. 11: Profilomètre Altisurf 500[53].

L'exécution des mesures est réalisée par le logiciel Phénix qui est l'interface de l'Altisurf. Ce logiciel permet de configurer l'ensemble des paramètres et de programmer .Il se décompose en une partie graphique et une partie serveur qui dialogue en perman en ce avec le matériel et fait appe là différentes cartes placées dans le PC industriel. Une fois que la mesure est réalisée ,elle est analysée par le logiciel d'analyse Altimap. Un exemple d'acquisition est présenté dans la Figure(II.12).

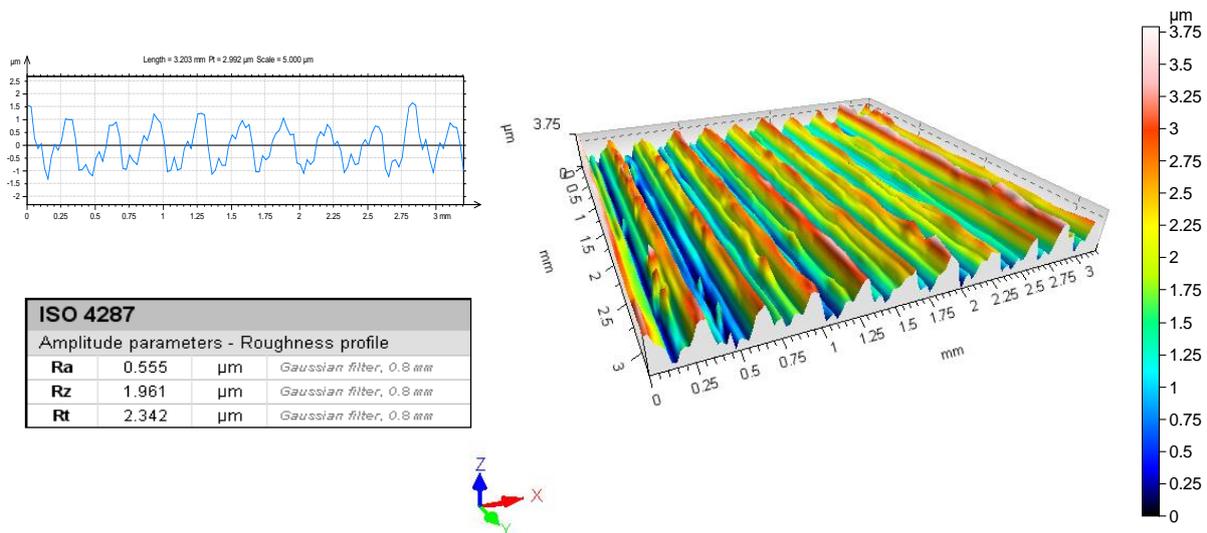


Figure II.12 : Rugosité de surface 2D et 3D mesurée par la plate-forme Altisurf-500

II.2.8. Microscope optique pour la quantification de l'usure :

A fin de caractériser l'usure en dépouille (VB) des différents matériaux de coupe étudiés, nous avons utilisé un microscope optique binoculaire du type VisualGage250 (Figure II.13a), équipé d'une caméra et doté de deux chariots à mouvements croisés et à affichage digital de précision de 0,001 mm. Il offre un grossissement compris entre G/4, G/10, G/40 et G/100. Les données sont acquises sur PC à l'aide du logiciel Visual Gage 2.2.0 (Figure II.13b), qui permet à tout opérateur comme au métrologue de mesurer rapidement et précisément la plupart des éléments géométriques. Il se distingue par sa facilité d'utilisation, son interface graphique et sa flexibilité lors de la création des rapports de mesure.



(a)



(b)

Figure II. 13 :(a) Microscope optique Visual Gage 250, (b) Logiciel visual Gage 2.2.0

Le VISUAL 250 présente les caractéristiques suivantes[56]:

- Etendue de mesure (X/Y) : 250 x 150 mm.
- Caméra CCD couleur, 752 x 582 pixels.
- Zoom indexable (0,7x à 4,5x).
- Eclairage diascoïque, LED verte
- Eclairage annulaire, LED blanche.
- Pointeur laser.
- Etalonnage : à 10 mm
- Température de référence : 20°C ±1°C.

La mesure s'effectue en plaçant la plaquette sur une table micrométrique à mouvements croisés. L'affichage digital sur l'interface graphique permet de localiser l'intersection de la face de coupe et de la face de dépouille de la plaquette, de prendre cette intersection comme ligne de référence à partir de laquelle l'usure en dépouille est évaluée.

II.2.9. Microscopie Électronique à Balayage :

Pour examiner la morphologie de l'usure et déterminer la composition chimique, nous avons utilisé la technique de microscopie électronique à balayage (MEB) couplé avec la spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDS)

Elle basée sur le principe des interactions électrons-matière, permettez-nous d'obtenir des images détaillées de la surface des échantillons révélant ainsi des caractéristiques d'usure telles que les fissures, les éraflures et les dépôts.

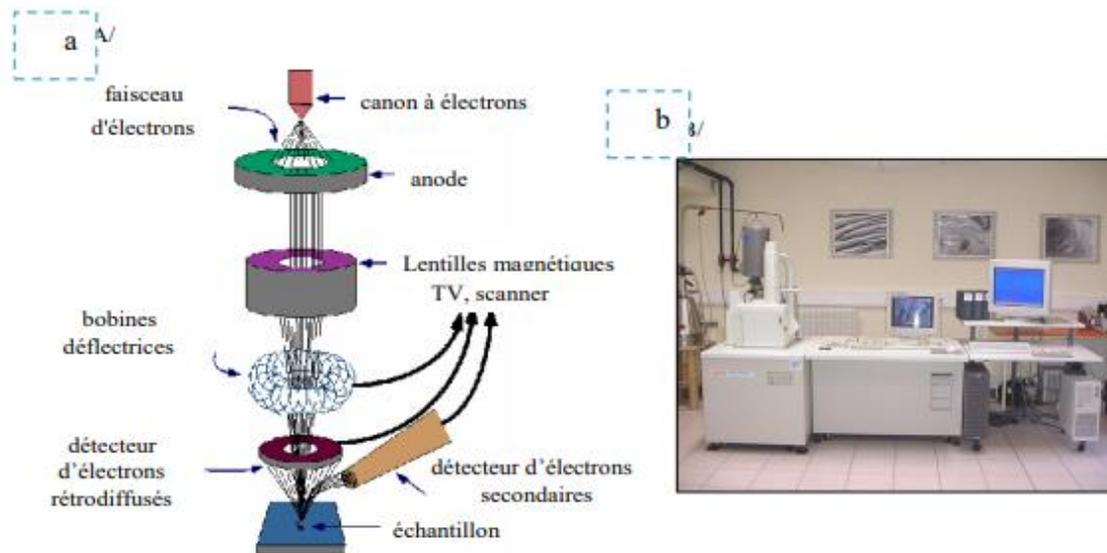


Figure II.14 : principe de microscopie électronique à balayage [57].

II.2.10. Diffraction des rayons X :

Nous avons utilisé la technique de la diffraction des rayons X (DRX) pour identifier et caractériser les matériaux poly cristallins, afin d'en déterminer leur cristallographie, leur structure poly morphique, leurs phases et d'observer leurs changements de cristallinité.

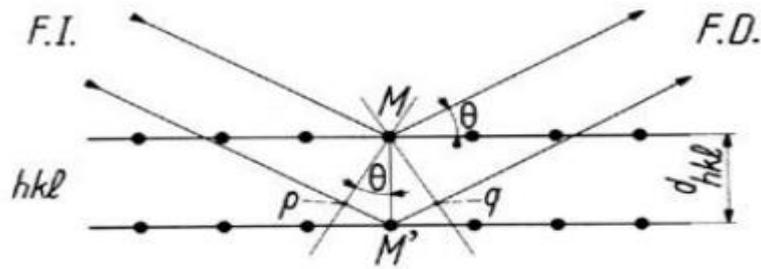


Figure II.15 : Condition de Bragg, principe de diffraction de rayons X [57].

II.3. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le matériel utilisé lors de la réalisation de nos travaux (machine-outil, éprouvettes, plaquette de coupe, porte-outil, dynamomètre et rugosimètre 2D et 3D).

Chapitre III:
Analyse et
discussion des
résultats

Chapitre III

Analyse et discussion des résultats

Sommaire:

III.1. Introduction.....	53
III.2. Evolution de l'usure des outils de coupe en fonction de temps d'usinage	53
III.3. Influence de l'usure sur les paramètres technologique de l'usinage.....	55
III.3. 1. Influence de l'usure sur les efforts et la pression de coupe	55
III.3.2. Influence de l'usure sur la rugosité de surface.....	Error! Bookmark not defined.
III.4. Caractérisation par DRX	Error! Bookmark not defined.
III.5. Mécanismes d'usure des outils de coupe.....	Error! Bookmark not defined.
III.6. Analyse de la rugosité de surface 3D.....	Error! Bookmark not defined.
III.5. Conclusion	56

III.1. Introduction

Cette étude, réalisée dans le cadre de ce chapitre, s'inscrit dans la continuité des travaux entrepris par A. Laouissi lors de sa thèse de doctorat [65]. Dans ses recherches, il s'est intéressé à l'impact des revêtements sur la durée de vie des outils de coupe, ainsi qu'à l'influence de l'usure sur la rugosité de surface et les forces de coupe. En tant qu'étudiants en génie des matériaux, notre rôle dans cette étude consiste à comprendre le rôle des revêtements sur les outils de coupe, ainsi que les différents mécanismes d'usure localisée au niveau des arêtes de coupe. Pour ce faire, nous utilisons des moyens tels que le microscope électronique à balayage (MEB), la spectroscopie de dispersion d'énergie (EDS) et la diffraction des rayons X (DRX) afin de mieux appréhender le comportement à l'usure des outils de coupe en nitrure de silicium (Si_3N_4) lors du tournage longitudinal de la fonte grise EN-GJL-250.

III.2. Evolution de l'usure des outils de coupe en fonction de temps d'usinage

La durée de vie des outils de coupe a été examinée à travers l'usure en dépouille V_b , qui est un indice important pour contrôler l'endommagement des outils de coupe, les mesures de ce dernier ont été exécutées selon la norme ISO 3685 (Figure III.1). L'usure en dépouille admissible est $V_b=0.3$ mm, au-delà de cette valeur, l'usure accroît brusquement et l'outil de coupe perd sa géométrie en affectant la qualité de la surface usinée, la précision dimensionnelle et les efforts de coupe.

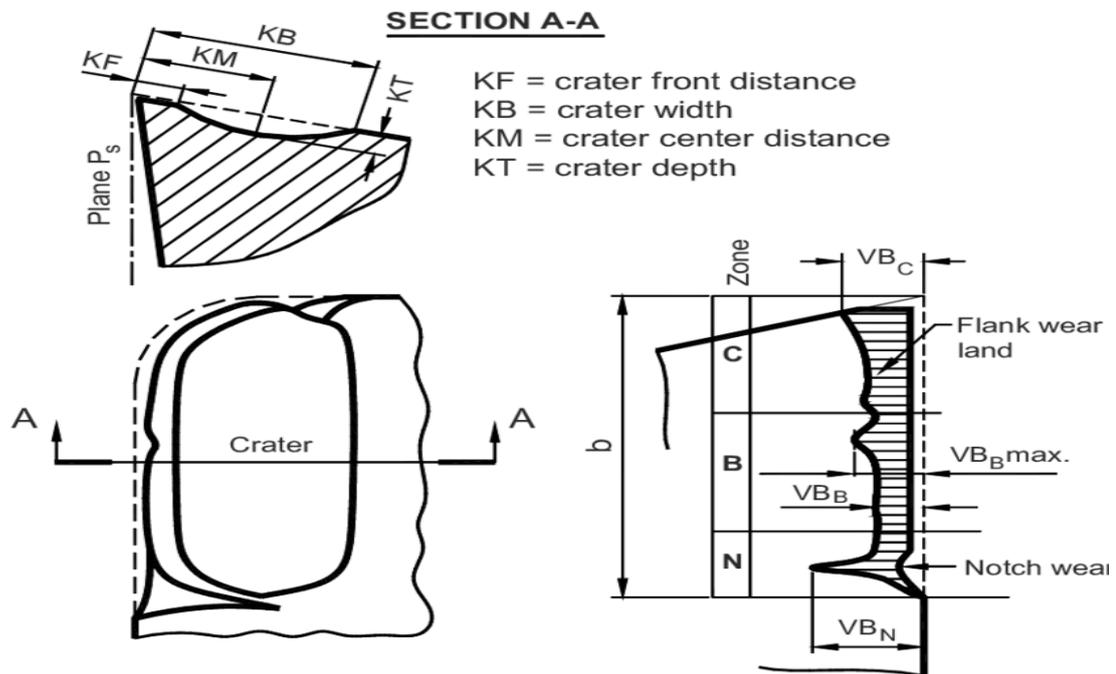


Figure III.1 : Types d'usure d'outils 3D basés sur ISO 3685 [58].

Les courbes de (la figure III.2) démontrent la progression de l'usure en dépouille (V_b) au fil du temps d'usinage pour les céramiques revêtues et non revêtues, à une vitesse de coupe de 400 m/min, une avance de 0,08 mm/tr et une profondeur de passe de 0,3 mm. Chaque courbe peut être divisée en trois phases distinctes. La première phase correspond à la phase de rodage, caractérisée par une usure rapide. La deuxième phase est la phase d'usure quasi-stationnaire, où l'usure est sous contrôle. Enfin, la troisième phase est celle de l'usure catastrophique, marquant la fin de vie de l'outil de coupe.

L'analyse de ces courbes révèle que, dans les mêmes conditions de coupe, l'outil revêtu atteint la phase d'usure catastrophique après 15 minutes d'usinage, tandis que l'outil non revêtu atteint cette phase après seulement 10 minutes. De plus, l'outil revêtu atteint sa durée de vie maximale après 23,3 minutes d'usinage, tandis que l'outil non revêtu présente une durée de vie de 16,6 minutes. Cela signifie que le revêtement CVD-TiAlN a contribué à augmenter la durée de vie de l'outil de 40%. Cette préexcellence de l'outil revêtu réside dans le revêtement CVD-TiAlN, qui agit comme une barrière améliorant la résistance à l'usure [59].

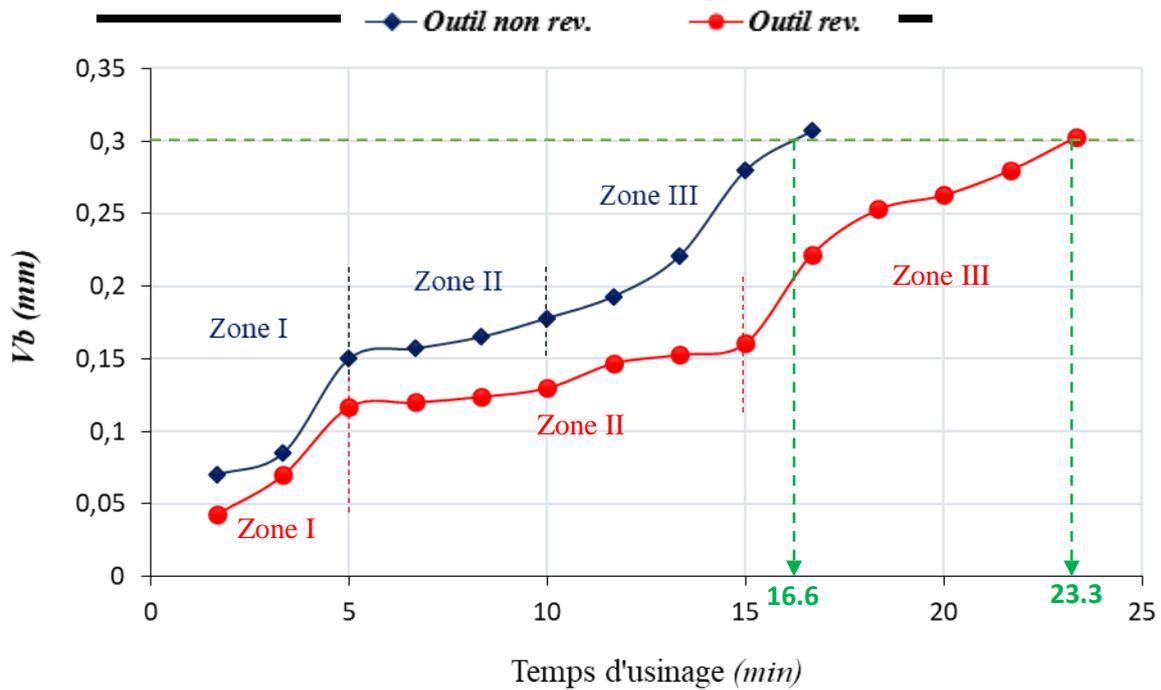


Figure III.2 : Evolution de l'usure des outils de coupe en fonction du temps d'usinage [65].

III.3. Influence de l'usure sur les paramètres technologique de l'usinage

III.3. 1. Influence de l'usure sur les efforts et la pression de coupe

Les figures III.3a et III.3b illustrent les variations de la pression de coupe (K_c) (Fig. III.3) et de l'effort de coupe tangentiel (F_z) (Fig. III.3) en fonction de l'usure (V_b) pour une vitesse de coupe de 400 m/min, une profondeur de passe de 0,3 mm et une avance de 0,08 mm/tr. On observe que toutes les courbes présentent une tendance à la hausse, ce qui indique que l'usure (V_b) a un effet significatif sur les efforts et la pression de coupe.

Chacune de ces courbes peut être divisée en trois zones. Dans la première zone, l'usure (V_b) a un effet considérable sur la variation de K_c et F_z , avec des augmentations de 120,98 % et 86,83 % respectivement pour CC1690 et CC6090. Dans la deuxième zone, les courbes sont plus stables, avec une augmentation de K_c de 42,51 % et de F_z de 32,46 % pour CC1690 et CC6090 respectivement. Dans la troisième zone, on remarque une autre augmentation significative de K_c et F_z , avec des pourcentages de 49,33 % et 42,52 % respectivement pour CC1690 et CC6090.

En résumé, tout au long de l'opération d'usinage, lorsque V_b atteint 0,3 mm, les paramètres K_c et F_z ont augmenté respectivement de 283,38 % et 235,26 %. Cette augmentation des efforts et de la pression de coupe en fonction de l'usure peut s'expliquer par l'augmentation de

la surface de contact entre l'outil et la pièce, ce qui entraîne une augmentation des forces de frottement et, par conséquent, des efforts de coupe.

III.5. Conclusion

L'étude expérimentale des performances des outils de coupe en céramique revêtues et non revêtues présenté dans ce chapitre exhibe le rôle important des revêtements TiAlN dans les outils de coupe. Les résultats obtenus montrent clairement la supériorité des outils revêtus en termes de la durée de vie, la qualité de surface, efforts et puissance de coupe.

C *onclusion Générale*

L'étude comparative des performances des outils de coupe en céramique à base de Si₃N₄ non revêtus et revêtus par CVD-TiAlN lors du tournage de la fonte grise EN-GJL-250 en termes de l'usure en dépouille, rugosité de surface, efforts et pression de coupe présentée en ce mémoire débouche sur les conclusions suivantes :

- La caractérisation d'usure des outils de coupe à l'aide du profilomètre optique, MEB, EDS montre que les mécanismes d'usure les plus dominants sont l'usure oxydative, usure abrasive et par diffusion.
- L'analyse des arrêtes de coupe par DRX montre que la couche du revêtement CVDTiAlN a subi un taux de déformation de 52.79 % par rapport à la déformation totale de l'arrête de coupe.
- Les essais de la durée de vie des outils de coupe revêtus et non revêtus montrent que la couche de revêtement CVD-TiAlN a contribué à augmenter la durée de vie de l'outil de 40 %.
- La céramique revêtue (CC1690) génère des meilleurs états de surface, faibles efforts et puissance de coupe par rapport à la céramique non revêtue (CC6090).
- L'analyse physico-chimique des arrêtes de coupe par MEB, EDS et DRX est très importantes lors de l'étude et l'investigation de l'usure des outils de coupe. Cela permet une bonne compréhension des phénomènes physico-chimique qui apparaissent au niveau de la zone de coupe.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1] Dr. Mohamed Karmaoui POLYCOPE Procédés de transformation et mise en forme des matériaux Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF 2020.
- [2] P. Jayaraman, "Studies on parametric optimization in turning of AA6063 T6 and AA6351 T6 alloys using various optimization techniques" 2017.
- [3] I.-C. GRUESCU. (2015). *Préparation de Production en Productique Mécanique - Étude de Fabrication et Analyse d'Usinage (3PM-EFAU)*.
Available: https://analyse-fabrication.univ-lille.fr/co/001_MOG_web.html. Consulté le 26 mars 2023
- [4] E. M. Trent and P. K. Wright, *Metal cutting*. Butterworth-Heinemann, 2000.
- [5] M. C. Shaw and J. Cookson, *Metal cutting principles*. Oxford university press New York, 2005.
- [6] V. Wagner, M. Baili, and G. Dessenin, "The relationship between the cutting speed, tool wear, and chip formation during Ti-5553 dry cutting," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, no. 5, pp. 893-912, 2015.
- [7] Sandvik. (2019). *Sandvik Carbide Grades With Descriptions*. Available: <https://www.cets.com/resources/sandvik-carbide-grades-with-descriptions.html>. Consulté le 26 mars 2023
- [8] Y. Huang, Y. K. Chou, and S. Y. Liang, "CBN tool wear in hard turning: a survey on research progresses," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 35, no. 5, pp. 443-453, 2007.
- [9] Z.-C. Lin and D.-Y. Chen, "A study of cutting with a CBN tool," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 49, no. 1-2, pp. 149-164, 1995.
- [10] A. E. DINIZ, F. C. MARCONDES, and N. L. COPPINI, "Tecnologia da Usinagem dos Materiais", Ed," *São Paulo, Artliber Editora*, pp. 11-17, 2001.
- [11] Christophe RAMIREZ Critères d'optimisation des alliages de TITane pour améliorer leur Usinabilité Doctorat ParisTech 2017
- [12] S. F. Y. Schoefs, Jean-Jacques Léon, *Productique mecanique*. 1999.
- [13] Y.-C. Yen, J. Söhner, B. Lilly, and T. Altan, "Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis," *Journal of materials processing technology*,

- vol. 146, no. 1, pp. 82-91, 2004.
- [14] S. Miller, "Advanced materials mean advanced engines," *Interdisciplinary Science Reviews*, vol. 21, no. 2, pp. 117-129, 1996.
- [15] L. Čerče, F. Pušavec, and J. Kopač, "A new approach to spatial tool wear analysis and monitoring," *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, vol. 61, no. 9, pp. 489-497, 2015.
- [16] Z. Liu, X. Ai, H. Zhang, Z. Wang, and Y. Wan, "Wear patterns and mechanisms of cutting tools in high-speed face milling," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 129, no. 1-3, pp. 222-226, 2002.
- [17] R. L. Vaughn, "Modern metals machining technology," 1966.
- [18] U. Khandey, "Optimization of surface roughness, material removal rate and cutting tool flank wear in turning using extended taguchi approach," 2009.
- [19] S. Coromant, *Modern Metal Cutting: A Practical Handbook*. Sandvik Coromant, 1994.
- [20] D. Ferraresi, *Fundamentos da usinagem dos metais*. Editora blucher, 2018.
- [21] A. K. Syed, J. Hardell, and B. Prakash, "Tribological behaviour of surface-treated and post-oxidized tool steels at room temperature and 400 C," *Estonian Journal of Engineering*, vol. 16, no. 2, p. 123, 2010.
- [22] Leonardo Roberto Silva, Odilon Soares Silva, Arthur Hermsdorff Cezar, Santos, and Matheus Barbosa de Medeiros Alvim, "Mecanismos de Desgaste de Ferramentas no Torneamento Com Alta Velocidade de Corte na Liga Ti-6Al-4V," *Nac. Eng. Mecanica*, pp. 4-13, 2016.
- [23] Sandvik, "Sandvik Coromant - Turning Tools (EN), 2019.
- [24] H. Chelladurai, V. Jain, and N. Vyas, "Development of a cutting tool condition monitoring system for high speed turning operation by vibration and strain analysis," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 37, no. 5, pp. 471-485, 2008.
- [25] F. Klocke, *Manufacturing Processes: Turning, Milling, Drilling*. Springer, 2011.
- [26] H. Tönshoff, B. Denkena, T. Friemuth, and C. Spengler, "Influence of different grinding processes on coating adhesion on cutting tools," in *3rd International Conference "The coatings"*, Nov, 2002, vol. 28, p. 29.
- [27] V. Venkatesh, C. Ye, D. Quinto, and D. E. Hoy, "Performance studies of uncoated, CVD-coated and PVD-coated carbides in turning and milling," *CIRP annals*, vol. 40, no. 1, pp. 545-550, 1991.
- [28] K. Undercoffer, B. Downey, F. Battaglia, and W. Bryant, "The development of an

- improved multilayer CVD coating for metalcutting applications," *Le Journal de Physique Colloques*, vol. 50, no. C5, pp. C5-783-C5-792, 1989.
- [29] H. Prengel, W. Heinrich, G. Roder, and K. Wendt, "CVD coatings based on medium temperature CVD κ - and α -Al₂O₃," *Surface and Coatings Technology*, vol. 68, pp. 217-220, 1994.
- [30] S. Söderberg, M. Sjöstrand, and B. Ljungberg, "Advances in coating technology for metal cutting tools," *Metal Powder Report*, vol. 56, no. 4, pp. 24-30, 2001.
- [31] H. Prengel, A. Santhanam, R. Penich, P. Jindal, and K. Wendt, "Advanced PVD-TiAlN coatings on carbide and cermet cutting tools," *Surface and Coatings Technology*, vol. 94, pp. 597-602, 1997.
- [32] F. Jungblut, H. Brandle, and H. Schulz, "Dry chip removal and hard machining," *Metalloberfläche(Germany)*, vol. 50, no. 12, pp. 984-986, 1996.
- [33] R. Rajasekar, "An experimental investigation on the influence of coating material on the machining characteristics of cutting tool inserts," 2019.
- [34] H. Prengel, P. Jindal, K. Wendt, A. Santhanam, P. Hegde, and R. Penich, "A new class of high performance PVD coatings for carbide cutting tools," *Surface and coatings technology*, vol. 139, no. 1, pp. 25-34, 2001.
- [35] K. Tönshoff *et al.*, "Wear mechanisms of (Ti_{1-x}, Al_x) N coatings in dry drilling," *Surface and Coatings Technology*, vol. 94, pp. 603-609, 1997.
- [36] K.-D. Bouzakis, N. Michailidis, N. Vidakis, K. Eftathiou, S. Kompogiannis, and G. Erkens, "Interpretation of PVD coated inserts wear phenomena in turning," *CIRP Annals*, vol. 49, no. 1, pp. 65-68, 2000.
- [37] N. Ånmark, A. Karasev, and P. G. Jönsson, "The effect of different non-metallic inclusions on the machinability of steels," *Materials*, vol. 8, no. 2, pp. 751-783, 2015.
- [38] R. V. Rao and O. Gandhi, "Digraph and matrix methods for the machinability evaluation of work materials," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, no. 3, pp. 321-330, 2002.
- [39] A. Ahmad-Yazid, Z. Taha, and I. P. Almanar, "A review of cryogenic cooling in high speed machining (HSM) of mold and die steels," *Scientific Research and Essays*, vol. 5, no. 5, pp. 412-427, 2010.
- [40] J. Raja, B. Muralikrishnan, and S. Fu, "Recent advances in separation of roughness, waviness and form," *Precision Engineering*, vol. 26, no. 2, pp. 222-235, 2002.
- [41] V. Lajoie. (2014). *Etats De Surface*.
Available: <https://docplayer.fr/5951355-6-etats-de-surface-6-2-defaults-de->

- rugosite.html. Consulté le 26 mars 2023.
- [42] https://www.cabww.com/uploads/case_studies/CastIronProp-wp.pdf
- [43] BAKHOUCHE Siham Recherche bibliographique sur les propriétés mécaniques d'une fonte fortement alliée au chrome utilisée dans l'industrie minière 2020 mémoire master
- [44] Simone PARENT-SIMONIN et Jean-Claude MARGERIE. Technique de l'ingénieur : traitement thermiques des fontes.
- [45] <https://pdhonline.com/courses/m568/m568content.pdf>
- [46] <http://thomas-eyraud.e-monsite.com/pages/les-fontes-blanches.html>.
- [47] <https://pdhonline.com/courses/m568/m568content.pdf>
- [48] Technique de l'ingénieur M 770; Jacques CHÉRIÈRE ; Propriétés des fontes à graphite nodulaire.
- [49]Laplanche, Les fontes et leur traitement thermique (tome II) page 139, 142 à 144, 160, 169, 170 à 172 .
- [50] Jacques Fargues, matériaux métalliques, Définitions, notions de base et classification des fontes, (2008), p312.
- [51] Technique de l'ingénieur M 380 ; Jean-Claude MARGERIE ; Propriétés des fontes
- [52] M. Nouioua, "Optimisation des paramètres de coupe lors de l'usinage à sec et avec une quantité minimale de lubrification," 2019.
- [53] OUAITA Mounir ETTUDE, MODELISATION ET SIMULATION DE L'USINAGE ORTHOGONAL PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS Présentée en vue de l'obtention du diplôme de MASTER UNIVERSITE BADJ MOKHTAR – ANNABA 2016
- [54] A. Chabbi, "Modélisation et optimisation des paramètres d'usinage lors du tournage du polyacétal POM C," 2018.
- [55] M. K. BABOURI, "Surveillance de l'évolution de l'usure d'un outil de coupe en tournage," 2016.
- [56] A. Chala. Thèse de doctorat .L'université de Biskra.2005.
- [57] C. Labidi.. Thèse de doctorat, ENSAM, CER de Cluny. Parie ,2006.58 .
- [58] ISO 3685:1993(en), Tool-life testing with single-point turning tools.
- [59] A. Khellaf, H. Aouici, S. Smaiah, et al. Comparative assessment of two ceramic cutting tools on surface roughness in hard turning of AISI H11 steel: including 2D and 3D surface topography. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, vol. 89,

no 1-4, p. 333-354.

[60] NILAVAZHAGAN, S., MUTHUKUMARAN, S., et ASHOKKUMAR, M. Structural, optical and morphological properties of La, Cu co-doped SnO₂ nanocrystals by co-precipitation method. *Optical Materials*, 2014, vol. 37, p. 425-432.

[61] GUENDOOUZ, Hassan, BOUAINE, Abdelhamid, et BRIHI, Nouredine. Biphase effect on structural, optical, and electrical properties of Al-Sn codoped ZnO thin films deposited by sol-gel spin-coating technique. *Optik*, 2018, vol. 158, p. 1342-1348.

[62] Peng Yi,, Yancong Liu,, Changfeng Fan, et al, Impact analysis of the thermal mechanical coupling characteristics of graphite morphologies during laser cladding of gray cast iron, *Optics & Laser Technology* 90 (2017) 52–64

[63] LAOUISSI, Aissa, NOUIOUA, Mourad, YALLESE, Mohamed Athmane, et al. Machinability study and ANN-MOALO-based multi-response optimization during Eco-Friendly machining of EN-GJL-250 cast iron. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 117, no 3-4, p. 1179-1192.

[64] H.le breton ,Manuel Pratique du Fondeur de Fonte ,Dunod paris 4eme Edition Trim.65(1966)

[65]Laouissi , Aissa. Etude du comportement du couple fonte/céramique en nitrure de silicium (Si₃N₄) revêtue et non revêtue, en sollicitations sévères lors du tournage-Modélisation et Optimisation. 2019. Thèse de doctorat.