



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية وزارة
التعليم العالي والبحث العلمي
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT GÉNIE MÉCANIQUE



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

**Influence de la vitesse de coupe sur l'usure et la rugosité lors
de l'usinage de l'acier C30 avec des outils en carbure
métallique revêtu et non revêtu.**

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Fabrication Mécanique et productique

Par

SAADI MOHAMED NASSIM

DIRECTEUR DE MEMOIRE : BOUZIANE ABDERAHIM MCB Université de Annaba

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : Mr. NEHAL Pr Université de Annaba

EXAMINATEURS : Mr. BOUZIANE M.C Université de Annaba

Mr. BENCHIHEUB M.C Université de Annaba

Année: 2025

Dédicace

Je dédie ce mémoire avec une profonde reconnaissance à ma chère mère, pilier de ma vie, dont l'amour inépuisable, les sacrifices silencieux et la foi indéfectible en moi ont été ma plus grande source de force et d'inspiration. À ma tante maternelle, qui a su être une seconde mère par sa tendresse, ses conseils avisés et sa présence constante à mes côtés dans les moments les plus décisifs. À mes frères, dont la présence, le soutien moral, les encouragements et la complicité ont été d'un réconfort inestimable tout au long de ce parcours exigeant. Et enfin, à mes amis, fidèles compagnons de route, pour leur amitié sincère, leur écoute, leur bonne humeur et les moments de partage qui ont rendu cette aventure plus légère et plus humaine. À vous tous, je vous exprime ma gratitude la plus sincère. Ce travail est le reflet de votre amour, de votre patience et de votre confiance en moi.

Mes sœurs et mes frères ;

Toute ma famille ;

Mes chers amis

Sommaire

Introduction général:.....	13
Chapitre I: Etude bibliographic.....	14
1. Introduction:	15
2. Définition de la coupe des métaux:	15
3. Définitions de l'aptitude à l'usinage.....	15
4. L'Usinabilité.....	16
4.1. Définitions de l'usinabilité.....	16
4.2. Critères d'évaluation de l'usinabilité	16
5. Concept du Couple Outil-Matière :	17
5.1. Température à l'interface Outil-Copeau	18
5.2. Distributions des contraintes à l'interface Outil-Pièce :.....	18
5.3. Coefficient de frottement:	19
6. Evolution des outils de coupe:.....	19
6.1. Introduction :	19
6.2. Matériaux pour plaquette de coupe :	20
6.2.1. Aciers rapides (HSS - High-Speed Steel) :	21
6.2.2. Carbures métalliques (Carbures de tungstène) :	22
6.2.3. Carbures revêtus :.....	22
6.2.4. Cermets :.....	22
6.2.5. Nitrure de Bore Cubique (CBN):.....	23
6.2.6. Le PCD (Diamant poly cristallin) :.....	23
6.3. Les revêtements :.....	24
6.3.1. Procédés de revêtement :.....	24
7. Usure des outils de coupe :.....	25
7.1. Introduction :	25
7.2. Mécanisme d'usure:.....	26
7.2.1. Usure abrasive :.....	26
7.2.2. Usure par adhésion :	27
7.2.3. Usure par diffusion :	27
7.2.4. Usure par oxydation :	28
7.2.5. Usure par déformation plastique :	29
7.3. Usure visible sur l'outil :	29

7.3.1.	Usure en dépouille.....	29
7.3.2.	Usure en cratère :.....	30
7.3.3.	Usure en entaille :.....	30
7.3.4.	Usure par écaillage et fissuration d'arête :.....	31
7.3.5.	Usure par arête rapportée:.....	31
7.4.	Relation entre usure et Temps:.....	32
7.5.	Critères d'usure :.....	33
7.6.	Modèles de Lois d'usure:.....	33
7.6.1.	Modèle de TAYLOR:.....	33
7.6.2.	Modèle de COLDING:.....	34
7.6.3.	Modèle de KONING-DEPIEREUX (1969):.....	34
7.6.4.	Bilan des modèles d'usure:.....	34
8.	Rugosité des surfaces usinée :.....	35
8.1.	Définition :.....	35
8.2.	Principaux défauts de surface :.....	36
8.3.	Définition des critères de rugosité (norme NF E 05-015).....	37
8.4.	Influence des principaux paramètres de coupe :.....	38
9.	Formation du copeau :.....	40
9.1.	Introduction :.....	40
9.2.	Mécanisme de la formation du copeau :.....	40
9.3.	Les différents types de copeaux :.....	42
9.3.1.	Définition de copeau :.....	42
9.3.2.	Les types de copeaux.....	42
9.4.	Influence de la vitesse de coupe :.....	43
10.	Chaleur et température :.....	44
10.1.	Introduction :.....	44
10.2.	Importance de la température :.....	44
10.3.	Origine de la chaleur :.....	44
10.4.	Répartition de la chaleur entre outil, copeau et pièce :.....	45
11.	Les efforts de coupe:.....	47
11.1.	Définition:.....	47
11.2.	Influence des différents facteurs sur les efforts de coupe :.....	47
11.2.1.	Les éléments du régime de coupe :.....	47

11.2.2.	Matière à usiner :	48
11.2.3.	Liquide de lubrification et de refroidissement :	48
11.3.	Mesure des efforts de coupe :	48
12.	Les vibrations :	49
12.1.	Définition:	49
12.2.	Les types des vibrations :	49
12.3.	Origine des vibrations en tournage :	50
12.4.	Effets des vibrations	51
12.5.	Prévention et réduction des vibrations	51
Chapitre II : Equipements utilises et procédure expérimentale		52
1.	Introduction :	53
2.	Equipements utilises :	53
2.1.	Machine outil :	53
2.2.	Matière a usiner :	53
2.3.	Plaquettes et porte a outils :	54
2.3.1.	Description des plaquettes :	54
2.3.2.	Porte plaquette :	55
2.4.	Microscope pour la mesure de l'usure :	55
2.5.	Rugosimètre pour la mesure de la rugosité :	56
2.6.	Modes de fixation des ébauches:	57
3.	Procédure expérimental :	57
3.1.	Planification des experiences:	57
3.2.	Méthode unifactorielle.	58
3.3.	Méthodes expérimentales :	59
4.	Mode opératoire de réalisation et Conditions de coupe :	59
4.1.	Mode opératoire de realisation:	59
4.2.	Condition de coupe :	60
Chapitre III : Résultats experimentaux , Analyse et interpretation		61
Partie 1 : Résultats expérimentaux		62
1.	Introduction :	62
2.	Résultats des essais de l'usure:	62
2.1.	Influence de la vitesse de coupe sur l'usure :	62
3.	Résultats des essais de la rugosité des surfaces usinées :	67

3.1. Influence de l'usure sur la rugosité des surfaces usinées :	67
Partie 2 : Analyse et interprétation :	71
1. Introduction :	71
2. Analyses des résultats de l'usure lors de l'usinage de l'acier C30 avec les outils P35 et GC4015 :	71
2.1. Analyse de l'influence de la vitesse de coupe sur l'usure :	71
2.2. Modèle mathématique de la tenue en fonction de la vitesse de coupe :	74
3. Analyses des résultats de la rugosité :	74
3.1. Analyse de l'influence de l'usure sur la rugosité des surfaces usinées :	74
Conclusion général :	76

Table de figure

Figure I.1 :Outil de coupe (plaquette) lors d'une opération de tournage	15
Figure I.2 :processus de coupe et critère d'usinabilité.....	16
Figure I.3:Date d'apparition des matériaux à outil sur le marché Européen.....	20
Figure I.4 :Comparaison de matériaux de coupe	21
Figure I.5 :Structure de différents aciers rapides : (a) Structure-métallurgie des poudres (carbures fins et homogènes), (b) Structure-procédé traditionnel (carbures gros et alignés)	21
Figure I.6 :Micrographie d'une nuance de cermet.....	22
Figure I.7 :Cermets microstructure	22
Figure I.8 :Microstructure du nitrure de bore cubique (CBN)	23
Figure I.9 :Diamant polycristallin microstructure.....	23
Figure I.10 :Revêtement d'une plaquette de coupe.....	24
Figure I.11 :Principaux modes de dépôt de revêtement pour outils-coupants	25
Figure I.12 :Mécanismes d'usure.....	26
Figure I.13 :usure abrasive.....	27
Figure I.14 :usure par adhésion.....	27
Figure I.15 :usure par diffusion.....	28
Figure I.16 :Usure par oxydation	29
Figure I.17:usure par déformation plastique	29
Figure I.18 :Caractéristiques d'usure en dépouille	30
Figure I.19 :usure en cratère et dépouille.....	30
Figure I.20 :usure en entaille	31
Figure I.21 :Usure par écaillage et fissuration d'arête	31
Figure I.22 :Usure par arête rapportée	31
Figure I.23 :Evolution de l'usure en fonction du temps de coupe.	32
Figure I.24 :Représentation graphique des différents modèles.....	35
Figure I.25 :Principaux défauts de surface.....	36
Figure I.26 :critères de rugosité	37
Figure I.27 :Principales zones de cisaillement du copeau.....	41
Figure I.28 :copeau	42
Figure I.29 :Formes de copeau A : copeau continu ; B : copeau segmenté ; C : copeau dentelé.....	43
Figure I.30 :Morphologie du copeau en fonction de la vitesse de coupe.....	43
Figure I.31 :Schéma des zones de dégagement de chaleur.	45
Figure I.32 :Répartition de la chaleur entre outil, copeaux et pièce.	46
Figure I.33 :Composantes de l'effort de coupe.....	47
Figure I.34 :vibration	49
Figure I.35 :Les vibrations forcées (f = fréquence et A = amplitude).....	50
Figure II.1 :tour parallèle modèle SN40	53
Figure II.2:plaquettes de coupe utilisées La plaquette grise est sans revêtement et l'autre revêtue avec un triple revêtement	54
Figure II.3:Carbure GC4015 à triple revêtement.	55
Figure II.4:porte outil utilisée	55
Figure II.5:Microscope pour la mesure de l'usure.....	56
Figure II.6:Principe de mise en position de la zone d'usure de la plaquette.	56
Figure II.7:Mesure de topographie in situ avec le rugosimètre portable Mitutoyo.....	56
Figure II.8:Eprouvette pour les essais d'usure.....	57

Figure II.9:schéma structural du processus de coupe.....	57
Figure III.1:Evolution de l'usure (VB, VC, VS) de l'outil P35 en fonction du temps lors de l'usinage de l'acier C30 pour différentes vitesses de coupe.	63
Figure III.2:Evolution de l'usure (VB, VC, VS) de l'outil GC4015 en fonction du temps lors de l'usinage de l'acier C30 pour différentes vitesses de coupe.	64
Figure III.3:Evolution de l'usure en dépouille (VB) du GC4015 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier C30	65
Figure III.4:Evolution de l'usure en dépouille (VB) du P35 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier C30.....	65
Figure III.5:Evolution de l'usure en dépouille (VB) en fonction du temps et du matériau de coupe lors de l'usinage de l'acier C30 pour différentes vitesses de coupe.	67
Figure III.6:Evolution de la rugosité (Ra, Rz, Rq) de l'outil P35 en fonction de l'usure VB lors de l'usinage de l'acier C30 pour différentes vitesses de coupe.	68
Figure III.7:Evolution de la rugosité (Ra, Rz, Rq) de l'outil GC4015 en fonction de l'usure VB lors de l'usinage de l'acier C30 pour différentes vitesses de coupe.	70
Figure III.8 : Tenues expérimentales des différents matériaux à outil à différentes vitesses de coupe, à [VB]=0.3 mm lors de l'usinage de l'acier C30	73

Liste des tableaux

Tableau 1 :Propriétés des outils spéciaux revêtus.....	25
Tableau 2 :Influence des paramètres de coupe sur la rugosité.....	38
Tableau 3 :Composition chimique de l'acier C30.....	54
Tableau 4 Descriptifs des plaquettes utilisées	54
Tableau 5 Caractéristiques géométriques du porte plaquette.....	55
Tableau 6 :Succession de réalisation des essais d'après la méthode unifactorielle.....	59
Tableau 7 :condition de coupe	60
Tableau 8 :Durées de vie des différents matériaux à outil testés en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier C30	72
Tableau 9 :Effets des différentes plages de vitesses de coupe sur la durée de vie des plaquettes : GC4015 et P35 pour [VB] = 0.3 mm.	73
Tableau 10 :Modèles de la tenue en fonction de la vitesse de coupe.	74

Nomenclature

a_p	profondeur de passe [mm]
COM	Couple outil matière
f	Avance [mm/tr]
F_x	Effort axial [N]
F_y	Effort radial [N]
F_z	Effort tangentiel [N]
HB	Dureté brinell
HRC	Dureté Rockwell
KT	Usure en cratère [mm]
L	Longueur du copeau usiné [mm]
r	Rayon de bec de l'outil [mm]
R^2	Coefficient de détermination
R_a	Rugosité moyenne arithmétique [μm]
R_q	L'écart moyen quadratique du profile [μm]
R_t	Rugosité totale [μm]
R_z	Profondeur moyenne de la rugosité [μm]
T	Tenue de l'outil [mn]
V	Volume du copeau [cm^3]
[VB]	Usure en dépouille admissible [mm]
VB	Usure en dépouille [mm]
V_c	Vitesse de coupe [m/min]
VN	Usure en entaille [mm]
VS	Usure en dépouille auxiliaire[mm]
α	Angle de dépouille [degré]
γ	Angle d'attaque [degré]
λ	Angle d'inclinaison d'arête [degré]
χ_r	Angle de direction principale [degré]

Résumé :

Le travail présenté consiste à étudier l'effet de la vitesse de coupe sur le couple "Outil-Pièce" en tournage. Les expériences ont été réalisées sur des éprouvettes en acier C30. L'usinage a été fait avec deux nuances de matériau à outil ; l'une en carbure métallique non revêtu (P35) et l'autre en carbure métallique à triple revêtement (GC4015). Les essais ont été effectués à différentes conditions de travail, afin de déterminer l'influence directe de chaque facteur (vitesse de coupe V_c , vitesse d'avance f , profondeur de passe a_p). Les paramètres technologiques, constituant l'objectif ou l'étude sont, le comportement à l'usure des outils testés et la qualité de la surface usinée.

Les résultats obtenus montrent que les paramètres de sortie étudiés sont en étroite corrélation avec les conditions de travail. L'outil en carbure revêtu (GC4015) a exprimé une meilleure tenue à l'usure par rapport au carbure non revêtu (P35). Les courbes du suivi de l'usure en fonction du temps montre que l'allure de cette dernière obéit à la loi universelle de l'usure de n'importe quelle pièce mécanique. Les résultats montrent aussi qu'avec l'évolution de l'usure la qualité de la surface se détériore. Ceci s'explique d'une part par l'accroissement progressif de l'usure suivant la surface d'attaque et de dépouille de l'outil.

Mots clés: tournage, couple "Outil-Pièce", usure de l'outil, rugosité.

Abstract :

The presented work focuses on studying the effect of cutting speed on the "Tool-Workpiece" interaction in turning operations. Experiments were carried out on C30 steel specimens. The machining was performed using two types of tool materials: one made of uncoated cemented carbide (P35) and the other of triple-coated cemented carbide (GC4015). The tests were conducted under different working conditions in order to determine the direct influence of each factor (cutting speed V_c , feed rate f , and depth of cut a_p). The technological parameters that constitute the objective of the study are the wear behavior of the tested tools and the surface quality of the machined parts.

The obtained results show that the output parameters studied are closely correlated with the working conditions. The coated carbide tool (GC4015) demonstrated better wear resistance compared to the uncoated carbide (P35). The wear progression curves over time indicate that the wear behavior follows the universal wear law applicable to any mechanical component. The results also reveal that as tool wear progresses, the surface quality deteriorates. This is explained, on one hand, by the gradual increase in wear on both the rake surface and principal flank surface of the tool.

Key words: Couple tool-work piece, wear, roughness, cutting force, formation of Chip.

ملخص

يركز هذا العمل على دراسة تأثير سرعة القطع على الثنائي " أداة- قطعة" في عملية الخراطة. تم إجراء التجارب على عينات من الفولاذ C30. وقد تم تنفيذ عملية التشغيل باستخدام نوعين من أدوات القطع: الأولى كربيد المعدني الغير مغلف (P35)، والثانية من كربيد المعدني المغلف بثلاث طبقات (GC4015) أجريت الاختبارات تحت ظروف تشغيل مختلفة بهدف تحديد التأثير المباشر لكل عامل (سرعة القطع (Vc) سرعة التغذية (f) عمق القطع (ap)) . وتتمثل المعايير التكنولوجية، التي تشكل هدف الدراسة، تآكل الأدوات المختبرة وخشونة السطح المشغل.

أظهرت النتائج المحصل عليها أن المعايير المدروسة مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بظروف التشغيل. وقد أظهر أداة الكربيد المغلف (GC4015) مقاومة أفضل للتآكل مقارنة بالكربيد غير المغلف (P35) كما أظهرت منحنيات تطور التآكل بمرور الزمن أن هذا الأخير يتبع القانون العام للتآكل الذي ينطبق على أي قطعة ميكانيكية. كما أظهرت النتائج أيضاً أنه مع تطور التآكل، تتدهور جودة السطح. ويُفسر هذا من جهة، بالزيادة التدريجية في التآكل على سطح الأمامي والسطح الخلفي الرئيسي للأداة.

الكلمات المفتاحية الثنائي ' قطعة-أداة '، التآكل، الخشونة، جهود القطع، تشكيل الجدادة.

Introduction général:

L'usinage est un des processus clés dans le secteur de la production mécanique, autorisant l'élaboration de pièces avec des tolérances dimensionnelles exactes et une qualité de surface supérieure. Dans ce processus, de nombreux facteurs sont en jeu, mais la vitesse de coupe a un impact crucial tant sur la durée de vie des outils de coupe que sur le niveau de qualité de la surface travaillée. Il est donc crucial de bien gérer ce paramètre pour garantir à la fois l'efficacité, la rentabilité et la performance du processus d'usinage.

Dans un secteur industriel où les besoins en termes de qualité, de coût et de compétitivité fluctuent sans cesse, saisir les phénomènes associés à l'usure des outils et à la finition de surface finale s'impose comme une priorité. L'acier C30, fréquemment employé dans les applications mécaniques en raison de ses caractéristiques équilibrées (durabilité, facilité d'usinage, prix), représente un matériau de choix pour l'analyse du processus d'usinage. Cependant, son usinage est sensible aux conditions de coupe, en particulier à la vitesse de coupe, qui affecte directement l'usure de l'outil et les propriétés de rugosité de la pièce usinée.

Par ailleurs, le recours à des instruments en carbure métallique, qu'ils soient dotés d'un revêtement ou pas, constitue une approche technologique fréquemment employée pour renforcer la résistance à l'usure, prolonger la durée de vie des outils et perfectionner la qualité de surface. Les revêtements, comme ceux qui contiennent des nitrures ou des carbures, offrent des améliorations significatives concernant la dureté, la résistance à la chaleur et le frottement, ce qui permet d'atteindre des vitesses de coupe supérieures.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est d'examiner expérimentalement l'impact de la vitesse de coupe sur l'érosion des outils et la finition de surface lors du fraisage de l'acier C30, en mettant en parallèle les performances d'outils revêtus et non revêtus en carbure métallique. Ce mémoire, grâce à des tests minutieusement exécutés et une étude méticuleuse des résultats, vise à apporter une contribution significative à la compréhension des phénomènes concernés et à fournir des outils d'aide à la prise de décision pour l'optimisation des paramètres de coupe en milieu industriel.

Chapitre I: Etude bibliographic

1. Introduction:

L'usinage constitue une étape essentielle dans le domaine de la mécanique, facilitant la conversion de matières premières en pièces finies présentant des dimensions et des propriétés spécifiques. L'efficacité et la qualité de cette méthode sont étroitement liées aux paramètres de coupe, comme la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (a_p). Ces paramètres ne déterminent pas seulement la productivité, mais influencent également des aspects critiques comme la rugosité de surface, la morphologie du copeau et les vibrations générées pendant l'usinage.

2. Définition de la coupe des métaux:

L'usinage par enlèvement de matière, basé sur les principes de la coupe des métaux, reste un procédé central en fabrication mécanique. Malgré l'apparition de techniques modernes, il demeure largement utilisé et économiquement significatif. L'amélioration de sa productivité repose sur une compréhension approfondie des mécanismes physiques qui le régissent. La maîtrise de ces connaissances est essentielle pour exploiter efficacement les technologies avancées et optimiser les performances en atelier.

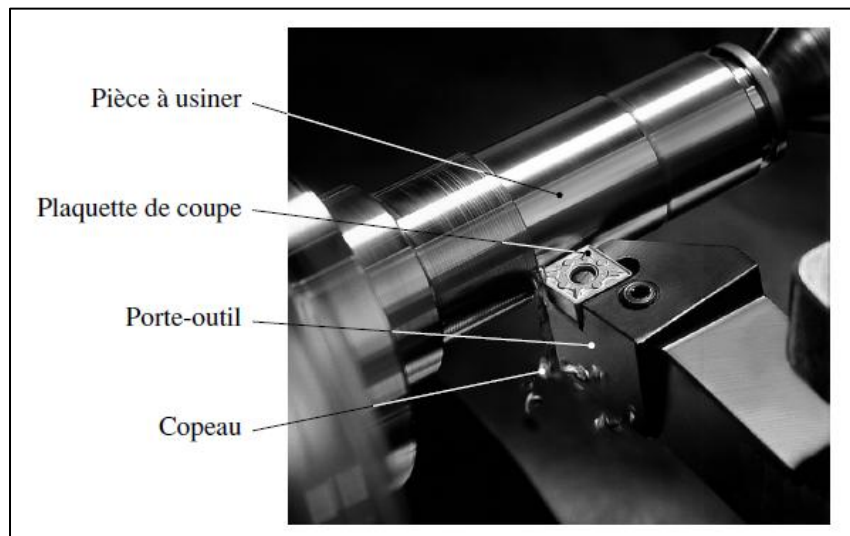


Figure I.1 :Outil de coupe (plaquette) lors d'une opération de tournage

3. Définitions de l'aptitude à l'usinage

L'usinage englobe diverses techniques pour la fabrication de pièces mécaniques. L'usinage fait référence au processus d'élimination de matière afin d'obtenir la forme et les dimensions voulues de la pièce initiale, en se servant d'une machine-outil. Le but est de réaliser des pièces en respectant une précision géométrique macro et micro requise, tout en réduisant les coûts de production. En réalité, la solution sélectionnée sera toujours une affaire de compromis, puisque toute amélioration des performances, en dehors de l'avancement technologique, ne peut être réalisée qu'en augmentant le coût de production.

4. L'Usinabilité

L'usinabilité, en tant que propriété très complexe du matériau usiné, représente une fonction de plusieurs variables, sur laquelle, influe un grand nombre de paramètres. (Figure I.2) nous montre une présentation générale de cette notion.

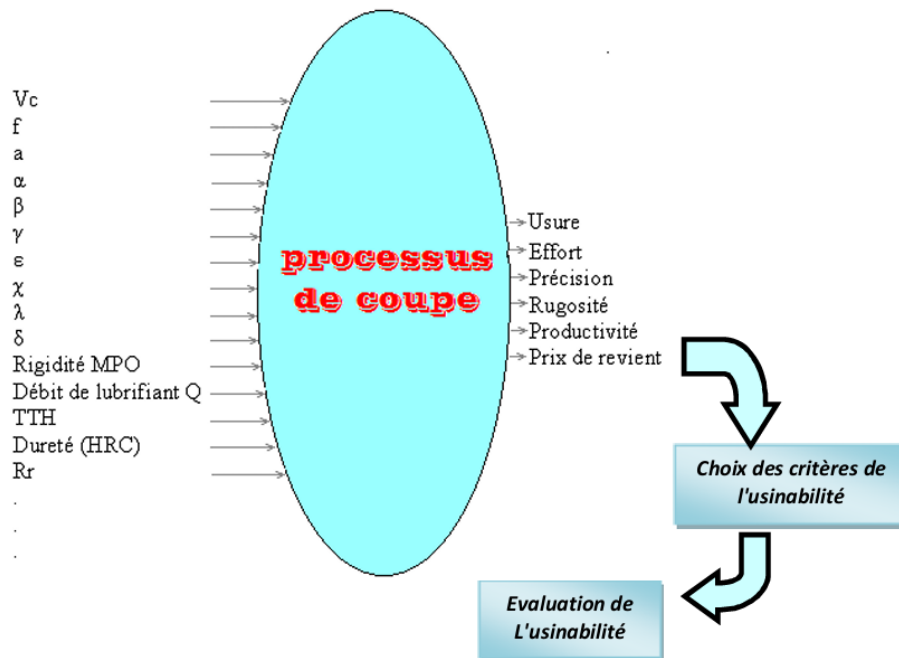


Figure I.2 : processus de coupe et critère d'usinabilité

L'étude de l'usinabilité a pour but de comparer le comportement de différentes matières, celles-ci étant usinées selon une même méthode d'usinage (tournage, par exemple), dans des conditions de coupe toujours identiques à elles-mêmes, à l'aide d'outils toujours identiques tant au point de vue de la composition chimique et du traitement thermique qu'au point de vue de leur forme et de leur affûtage [1]

4.1. Définitions de l'usinabilité

L'étude de l'usinabilité est particulièrement complexe car elle implique deux disciplines scientifiques et techniques distinctes. D'un côté, il y a la dimension métallurgique qui englobe les conditions de production et les procédés de fabrication, dont l'interaction donne lieu aux caractéristiques spécifiques du métal à travailler. De l'autre côté, on trouve la dimension mécanique qui inclut les conditions d'application du métal dans le cadre de son façonnage pour une utilisation prévue.

4.2. Critères d'évaluation de l'usinabilité

Selon les chercheurs qui ont travaillé dans le domaine de l'usinabilité, on trouve une variété des critères de son évaluation.

- D'après A. CZAPLICKI [2] : les critères de l'usinabilité sont :

- ✓ La vie d'outil permettant la production maximale.
- ✓ Les efforts de coupe donnant une indication sur la puissance nécessaire à la broche de la machine-outil.
- ✓ Le fini des surfaces usinées permettant de choisir les conditions de coupe en fonction de la destination finale de la pièce usinée.
- D'après P. MATHON [3] : Les principaux critères sont classés selon l'ordre suivant :
 - ✓ La rugosité de la surface usinée, définissant l'aptitude au fini de surface.
 - ✓ La force de coupe définissant la résistance de la coupe.
- La durée de vie de l'outil, ou la vitesse de coupe permettant d'obtenir une durée d'outil donnée ou l'usure pour un temps donné. Par contre d'autre chercheur prennent l'usure comme l'effet le plus observable.
- D'après M. ROBELET [4] : Les principaux critères sont classés de la manière suivante :
 - ✓ L'usure de l'outil.
 - ✓ L'effort de coupe.
 - ✓ La température de coupe.
- La majorité des chercheurs évaluent l'usinabilité par les critères ordonnés comme suit :
 - ✓ La tenue de l'outil, ou un critère dépendant (VB, KT) ;
 - ✓ Les efforts des coupes.
 - ✓ La qualité de la surface usinée.
- L'absence de la température de coupe prouve qu'il s'agit d'un effet perturbateur lié fortement avec les critères :
 - ✓ Usure.
 - ✓ Effort de coupe.

5. Concept du Couple Outil-Matière :

Le couple outil-matière est un concept fondamental en usinage qui décrit l'interaction complexe entre l'outil de coupe et la matière usinée. Cette interaction est influencée par plusieurs facteurs, notamment :

- **Propriétés des matériaux** : L'outil et la pièce ont une importance capitale concernant leur dureté, résistance à la traction et conductivité thermique. Par exemple, on utilise fréquemment un instrument en carbure de tungstène pour le traitement des aciers durs, grâce à sa capacité à résister à l'usure.
- **Géométrie de l'outil** : L'outil, par sa configuration (angle de coupe, angle de dépouille, rayon de bec), exerce une influence sur le retrait du matériau et la qualité de la surface travaillée.
- **Conditions de coupe** : La vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe influencent directement l'interaction entre l'outil et la matière.
- **La vitesse de coupe (VC)** : est la vitesse relative entre l'outil et la pièce au point de contact. Elle est généralement exprimée en mètres par minute (m/min) et est déterminée par la formule :

$$V_c = \pi \times D \times N / 1000$$

- V_c : Vitesse de coupe (m/min).
- D : Diamètre de l'outil ou de la pièce (mm).

- N : Vitesse de rotation de l'outil ou de la pièce (tr/min).
- **La vitesse d'Avance (Vf)** : est la distance parcourue par l'outil pendant une révolution de la pièce ou de l'outil. Elle est exprimée en millimètres par tour (mm/tr) et est donnée par :

En tournage : $V_f = f \times N$

- F: Avance par tour (mm/tr).
- Vf: Vitesse d'avance (mm/min).
- N : Vitesse de rotation (tr/min).
- **La profondeur de passe (ap)** : est la quantité de matière enlevée en une seule passe. Elle est exprimée en millimètres (mm) et dépend de la géométrie de l'outil et des conditions d'usinage. [5]

5.1. Température à l'interface Outil-Copeau

L'occurrence de température à l'interface entre l'instrument et le copeau est primordiale en matière d'usinage, car elle résulte du frottement et de la déformation plastique du matériau. Cette température peut atteindre des niveaux extrêmement haut (parfois plusieurs centaines de degrés Celsius), conduisant à différentes répercussions :

- **Usure de l'outil** : Une température excessive peut entraîner une usure rapide de l'outil, en particulier par des mécanismes tels que la diffusion ou l'oxydation.
- **Qualité de surface** : Une température élevée peut provoquer des défauts de surface, comme des fissures ou des modifications microstructurales dans la pièce.
- **Déformation thermique** : La chaleur générée peut causer une dilatation thermique de l'outil ou de la pièce, affectant la précision dimensionnelle.

Pour contrôler cette température, des lubrifiants ou des fluides de coupe sont souvent utilisés pour refroidir l'interface et réduire la friction.

5.2. Distributions des contraintes à l'interface Outil-Pièce :

Les distributions des contraintes à l'interface outil-pièce décrivent comment les forces mécaniques sont réparties pendant l'usinage. Ces contraintes sont influencées par :

- **La géométrie de l'outil** : Un outil bien conçu peut répartir les contraintes de manière uniforme, réduisant ainsi les risques de déformation ou de rupture.
- **Les paramètres de coupe** : Une vitesse de coupe trop élevée ou une avance trop importante peut concentrer les contraintes sur une petite zone, augmentant le risque de dommages.
- **Les propriétés de la matière** : Les matériaux durs ou fragiles peuvent générer des contraintes plus élevées, nécessitant des outils et des conditions de coupe adaptés.

Une analyse précise de ces distributions permet d'optimiser les paramètres de coupe pour minimiser les défauts, améliorer la qualité de surface et prolonger la durée de vie des outils.

5.3. Coefficient de frottement:

Le coefficient de frottement mesure la résistance au glissement entre l'outil et la matière usinée. Ce coefficient dépend de plusieurs facteurs :

- **Nature des matériaux** : Les matériaux ayant une affinité chimique élevée (par exemple, l'aluminium et l'acier) peuvent avoir un coefficient de frottement plus élevé.
- **État de surface** : Une surface rugueuse ou contaminée peut augmenter le frottement, tandis qu'une surface lisse et propre peut le réduire.
- **Conditions de coupe** : La vitesse de coupe et la pression appliquée influencent également le frottement.

Un frottement élevé peut entraîner :

- ✓ Une augmentation de la température à l'interface outil-copeau.
- ✓ Une usure accélérée de l'outil.
- ✓ Une dégradation de la qualité de surface.

Pour réduire le coefficient de frottement, des lubrifiants ou des revêtements spéciaux (comme le nitrure de titane) sont souvent utilisés.

6. Evolution des outils de coupe:

6.1. Introduction :

Les outils en métal dur, principalement destinés à l'usinage des métaux, sont également employés dans divers secteurs industriels comme les mines, la menuiserie ou la production papetière. Le marché mondial de ces outils est ainsi particulièrement étendu. Leur utilisation dans la transformation des métaux concerne des industries stratégiques telles que l'automobile, l'aérospatiale et l'aéronautique. Afin d'optimiser la productivité, les enjeux consistent à accroître les vitesses de coupe et les volumes de matière enlevés par passe, tout en maintenant une excellente précision et une qualité de surface irréprochable. Ces impératifs économiques cruciaux motivent la conception d'outils de coupe plus performants, aptes à fonctionner dans des conditions d'usinage toujours plus sévères.

Un outil de coupe optimal doit réunir plusieurs propriétés fondamentales :

- Une ténacité adéquate pour résister aux sollicitations mécaniques
- Une résistance élevée à la déformation plastique pour préserver sa géométrie
- Une déformation élastique limitée garantissant une précision maximale
- Une grande dureté assurant une résistance à l'usure accrue
- Une excellente stabilité thermique pour supporter les températures extrêmes générées lors de la coupe

Ces caractéristiques sont déterminantes pour assurer à la fois la **durée de vie** des outils et la qualité des pièces produites.

Depuis 1890, différents matériaux ont été développés pour répondre à ces exigences, permettant l'évolution vers des machines-outils toujours plus performantes. Cette progression historique est illustrée par le graphique mentionné.

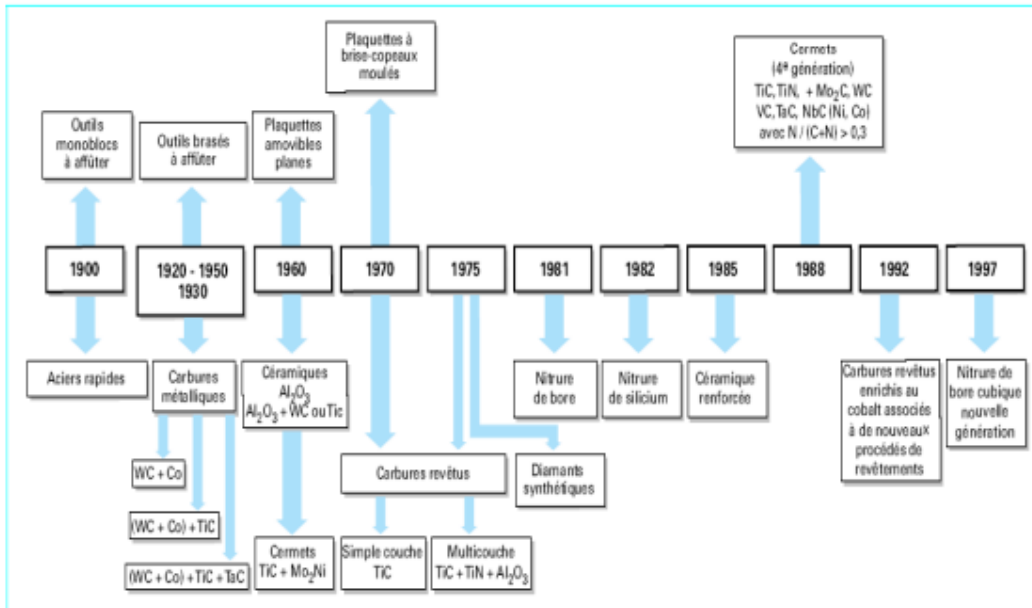


Figure I.3: Date d'apparition des matériaux à outil sur le marché Européen

6.2. Matériaux pour plaquette de coupe :

La sélection d'un matériau pour un instrument est le fruit de plusieurs compromis. Un simple changement dans les conditions de coupe, le procédé d'usinage ou le matériau de la pièce peut suffire à perturber cet équilibre. C'est la raison pour laquelle on trouve une vaste gamme de matériaux de coupe. On peut classer les divers matériaux utilisés pour les instruments de coupe en différentes catégories :

- ✓ Les aciers rapides (HSS),
- ✓ Les carbures,
- ✓ Les cermets,
- ✓ Les céramiques,
- ✓ Les matériaux ultra-durs (Nitrure de bore cubique CBN, diamant poly cristallin PCD).

La (Figure I.4) schématise la position des classes de matériaux utilisés dans un diagramme (dureté-température, dureté-ténacité) et permet d'entrevoir que les domaines d'applications de chaque classe doivent être spécifiques.

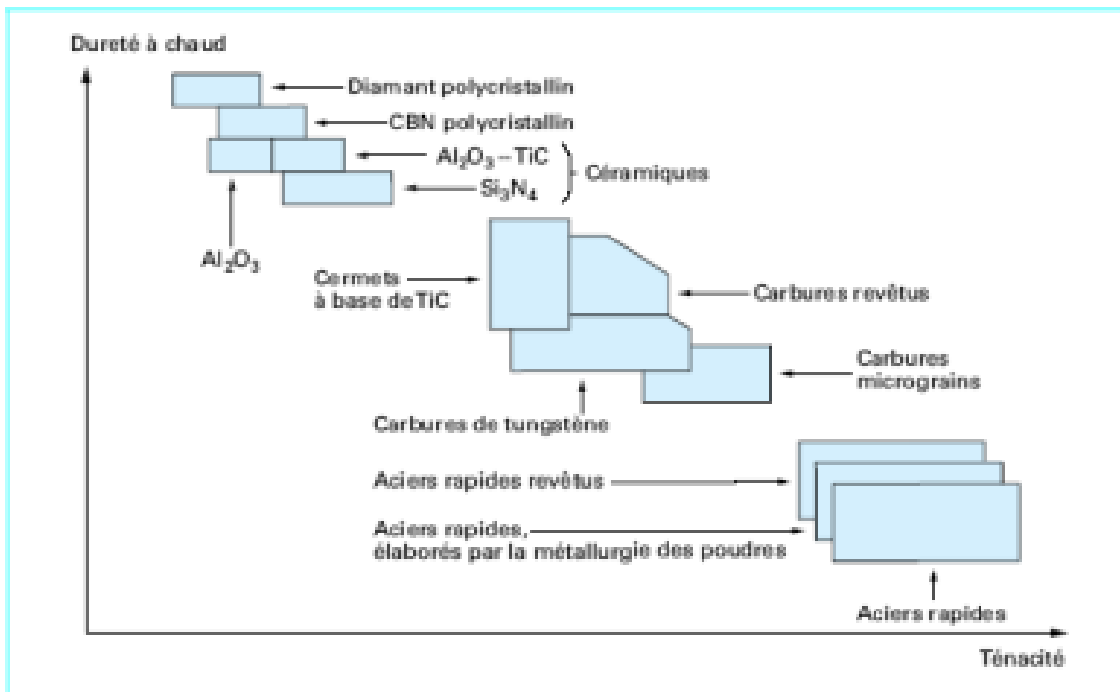


Figure I.4 : Comparaison de matériaux de coupe

6.2.1. Aciers rapides (HSS - High-Speed Steel) :

Les aciers rapides se distinguent par leur composition en tant qu'alliages d'acier hautement carbonés, renforcée par l'ajout d'éléments d'alliage comme le tungstène, le molybdène, le vanadium et le chrome. On les utilise pour produire des outils de coupe capables de résister à des vitesses de coupe élevées tout en maintenant leur dureté sous des températures élevées.

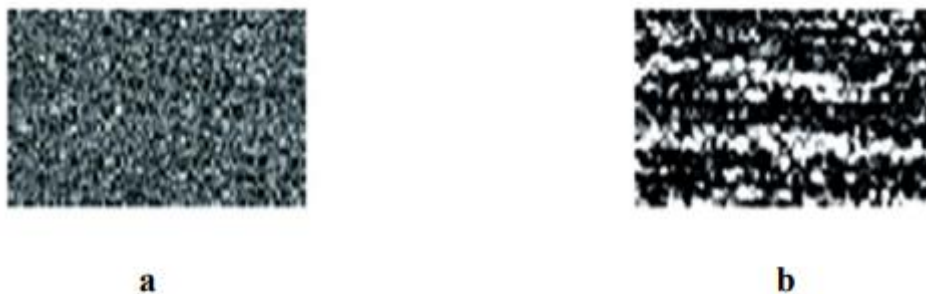


Figure I.5 : Structure de différents aciers rapides : (a) Structure-métallurgie des poudres (carbures fins et homogènes), (b) Structure-procédé traditionnel (carbures gros et alignés)

6.2.2. Carbures métalliques (Carbures de tungstène) :

Les carbures métalliques se composent de particules de carbure, généralement de tungstène, unies par une matrice métallique, le plus souvent du cobalt, formant ainsi des matériaux composites. Ils sont particulièrement robustes, résistent à l'abrasion et sont employés pour des instruments de coupe efficaces dans des conditions rigoureuses.

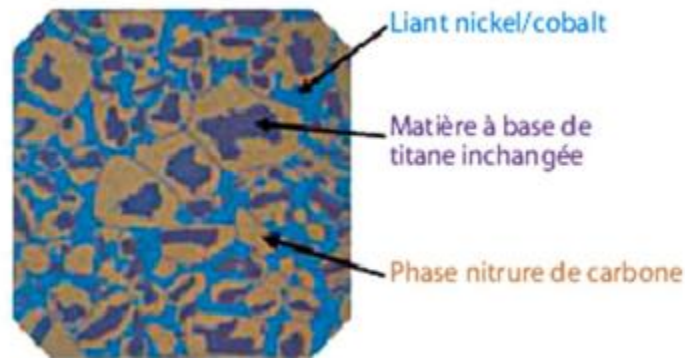


Figure I.6 :Micrographie d'une nuance de cermet

6.2.3. Carbures revêtus :

Les outils en carbure revêtu sont des instruments en carbure métallique qui possèdent une mince couche de matériau résistant (tel que le nitrure de titane TiN, l'alumine Al_2O_3 ou le carbure de titane TiC) sur leur surface. Ce revêtement renforce la résistance à l'abrasion, augmente la dureté et prolonge la durée de vie de l'outil.

6.2.4. Cermets :

Les cermets sont des matériaux composites constitués de particules céramiques (comme le carbure de titane TiC ou le nitrure de titane TiN) dispersées dans une matrice métallique (souvent du nickel ou du cobalt). Ils combinent la dureté des céramiques et la ténacité des métaux, idéaux pour l'usinage à haute vitesse.

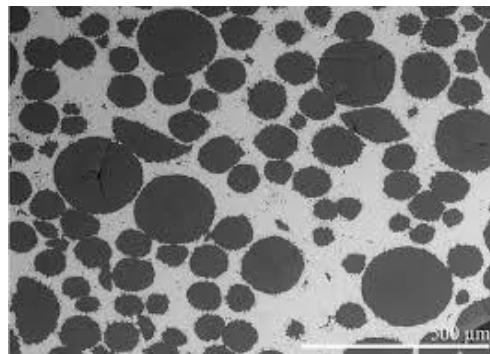


Figure I.7 :Cermets microstructure

6.2.5. Nitrure de Bore Cubique (CBN):

Possède une dureté extrêmement élevée, surpassée uniquement par celle du diamant. À chaud, cette dureté reste exceptionnelle et il est apte à être employé jusqu'à 2000°C. Il est moins fragile que la céramique et offre une résistance exceptionnelle à l'usure par abrasion. Son prix élevé restreint principalement sa production à grande échelle. Les cristaux de CBN, qui sont comparables aux Les diamants synthétiques sont maintenus ensemble par un liant céramique ou métallique. Un liant céramique, bien qu'il ait une ténacité modeste, se distingue par sa stabilité chimique exceptionnelle et sa remarquable résistance à l'abrasion. Le liant métallique possède des caractéristiques inverses (grande ténacité et résistance à l'abrasion réduite). Il est recommandé d'utiliser le CBN pour l'usinage de composants dont la dureté dépasse 48HRC.

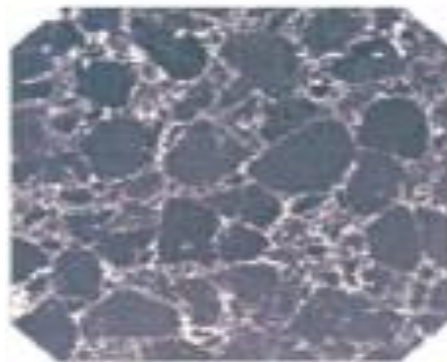


Figure I.8 :Microstructure du nitrure de bore cubique (CBN)

6.2.6. Le PCD (Diamant poly cristallin) :

C'est un diamant synthétique qui présente une dureté comparable à celle du diamant naturel (10 sur l'échelle de Mohs). Ce matériau coûte cher et son utilisation se limite à l'usinage de matériaux qui ne contiennent pas de fer. Leur grande résistance à l'abrasion les rend économiquement rentables pour travailler des matériaux très abrasifs comme les composites et le graphite.

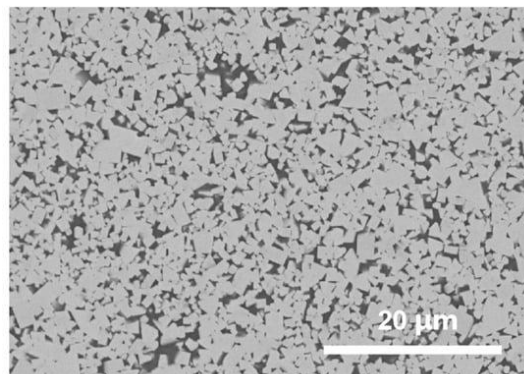


Figure I.9 :Diamant polycristallin microstructure

6.3. Les revêtements :

Les revêtements ont une influence significative sur le processus d'usinage. Une sélection précise et appropriée du revêtement des arêtes de l'outil, en fonction de la tâche d'usinage, offre les avantages suivants :

- Augmentation de la durée de vie.
- Efforts de coupe réduits.
- Vitesses de coupe et d'avance supérieures.
- Meilleure qualité de surface.
- Usinage à sec amélioré
- Usinage dur amélioré jusqu'à 68 HRC.

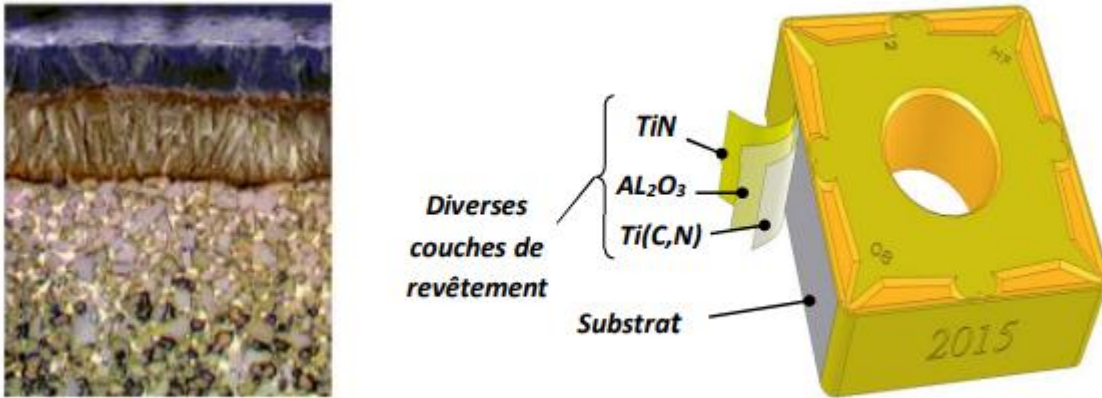


Figure I.10 : Revêtement d'une plaquette de coupe

6.3.1. Procédés de revêtement :

Des couches de matière dure peuvent être appliquées tant chimiquement que physiquement. Variantes :

- Procédé CVD (Chemical Vapor Deposition),
- Procédé PVD (Physical Vapor Deposition).

La technique de dépôt chimique en phase gazeuse (CVD) est fréquemment employée pour le revêtement, comme c'est le cas pour les carbures. Il est spécialement conçu pour la production de couches multiples, étant donné que les différentes compositions de couches peuvent facilement être appliquées par le biais de la phase gazeuse. Elles sont mises en œuvre sur la surface dans différentes épaisseurs, agencements et ordres. Le procédé PVD (dépôt physique en phase vapeur) offre un avantage sur le procédé CVD grâce à sa capacité de séparer les matériaux à haute température de fusion à des températures basses, tout en protégeant le substrat. Un autre bénéfice est la diminution de l'épaisseur de la couche, associée à la préservation d'un bord de coupe plutôt aiguisé (réduction du rayon d'arête), comme cela est fréquemment requis lors de la finition et de l'usinage de précision.

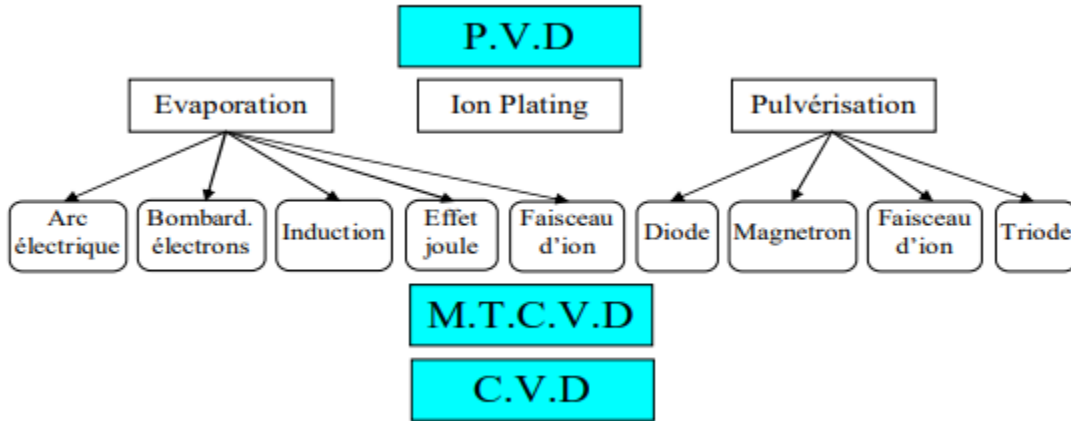


Figure I.11 : Principaux modes de dépôt de revêtement pour outils-coupants

Les revêtements permettent par conséquent d'obtenir des durées de vie nettement supérieures et de remplacer des matières fortement traitées par des matériaux moins durs, mais revêtus (p. ex. les couches DLC (diamond like carbure) appliquées sur des aciers à outils tenaces remplacent des carbures cassants). (tableau 1) met en parallèle différentes propriétés de couches de matière dure. Le choix de la couche correspondante doit toujours être adapté à la tâche d'usinage concernée. [1]

Tableau 1 : Propriétés des outils spéciaux revêtus

Type de revêtement	Dureté [HV]	Coefficient de conductibilité thermique [kW/mK]	Temperature d'utilisation maximal [°C]
TIN	2200	0,07	600
TICN	3000	0,1	450
TIALN	3300	0,05	800
Diamant	10000	2,0	600

7. Usure des outils de coupe :

7.1. Introduction :

La dégradation des outils de coupe est un processus inéluctable dans les opérations d'usinage, qui se manifeste par l'altération graduelle de la zone active de l'outil en interaction avec le matériau usiné. Cet attrition a un impact direct sur la qualité des pièces usinées, la précision dimensionnelle, l'efficacité de production et les dépenses de fabrication. Il est donc essentiel de saisir les processus d'usure et les éléments qui les affectent pour améliorer les conditions de coupe et allonger la durée de vie des outils.

Lors de l'usinage, les outils sont exposés à des conditions particulièrement sévères : températures élevées, fortes pressions, frictions intenses et chocs mécaniques. Ces contraintes provoquent Pendant le processus

d'usinage, les outils subissent des conditions particulièrement rigoureuses : des températures élevées, des pressions intenses, des frottements puissants et des impacts mécaniques. Ces restrictions entraînent divers genres de détérioration, y compris l'abrasion, l'adhésion, la diffusion, la déformation plastique et l'oxydation. Ces phénomènes sont influencés par les propriétés des matériaux de l'instrument et de la pièce, les paramètres de coupe (vitesse, avance, profondeur de passe), ainsi que les conditions d'usinage comme la lubrification et le refroidissement. L'industrie considère la gestion efficace de l'usure des outils comme un enjeu stratégique. Elle sert à minimiser les temps d'arrêt des machines, à diminuer les dépenses liées au renouvellement des outils et à garantir une qualité supérieure des produits finaux. Pour satisfaire à ces critères, on utilise des matériaux de coupe sophistiqués tels que les carbures, les céramiques ou le diamant) et l'emploi de revêtements protecteurs (comme le TiN ou l' Al_2O_3) est pratiqué, alors que les paramètres de coupe sont soigneusement modifiés en fonction de chaque application.

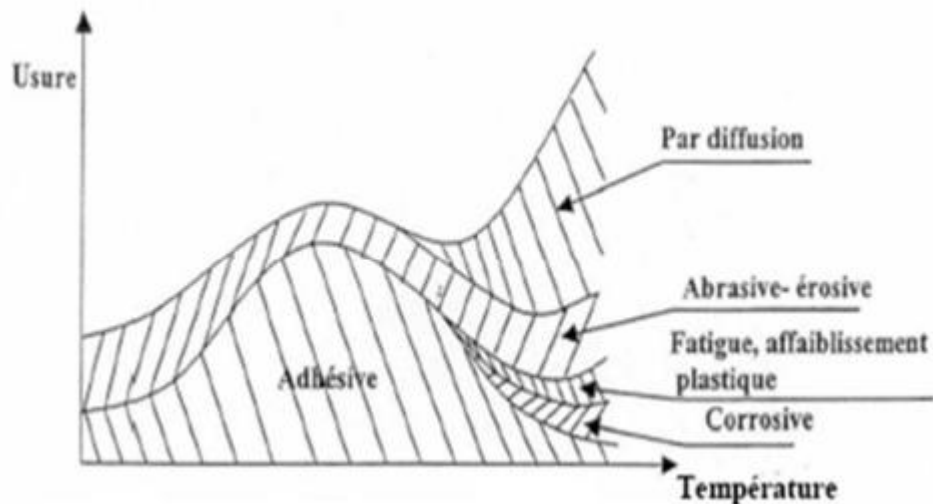


Figure I.12 : Mécanismes d'usure

7.2. Mécanisme d'usure:

Il est possible de catégoriser les processus d'usure en divers genres selon le type de charge tribologique et les matériaux concernés. Une combinaison complexe de mécanismes est à l'origine d'eux, parmi lesquels les quatre suivants revêtent une importance particulière :

7.2.1. Usure abrasive :

L'abrasion est un mode de détérioration courant pendant l'usinage, qui découle du contact entre des particules rigides et la surface de l'instrument de coupe. Ces particules peuvent avoir différentes origines, y compris les débris produits durant le processus d'usinage ou les impuretés contenues dans le fluide de lubrification.

Lorsque ces particules abrasives interagissent avec l'outil, elles provoquent une érosion progressive de sa surface, altérant ainsi sa géométrie. Cette dégradation a des répercussions directes sur la précision et la qualité des pièces usinées. Par exemple :

- **L'usure des flancs** peut induire des écarts dimensionnels sur la pièce.
- **L'usure par encoches** dégrade la surface de coupe, nuisant à la finition et à l'intégrité de la pièce.

De plus, l'action localisée des particules peut générer des cratères à la surface de l'outil, accélérant sa détérioration et réduisant sa durée de vie.

Ce phénomène complexe influence directement les performances des outils et la qualité des pièces produites. Une meilleure compréhension de l'usure abrasive est donc essentielle pour optimiser les paramètres d'usinage et améliorer la durée de vie des outils.

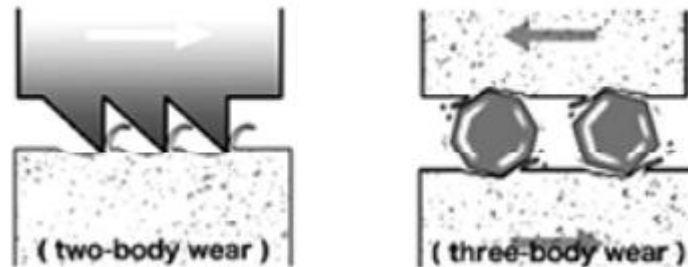


Figure I.13 : usure abrasive

7.2.2. Usure par adhésion :

L'usure par adhésion des outils de coupe survient lorsque des particules du matériau usiné se fixent à la surface de l'outil en raison des températures élevées générées pendant l'usinage. Ce phénomène entraîne la formation de micro-soudures aux points de contact entre les deux surfaces. Lors du glissement, ces soudures se rompent, provoquant l'arrachement de fragments du matériau le plus tendre, qui adhèrent à l'outil.

Cette usure accroît la friction, élève la température locale et accélère la dégradation de l'outil. Pour en limiter les effets, il est recommandé d'utiliser des revêtements anti-adhérents, d'adapter les paramètres de coupe et de recourir à une lubrification efficace. Ces mesures visent à prolonger la durée de vie de l'outil tout en maintenant une bonne qualité d'usinage.

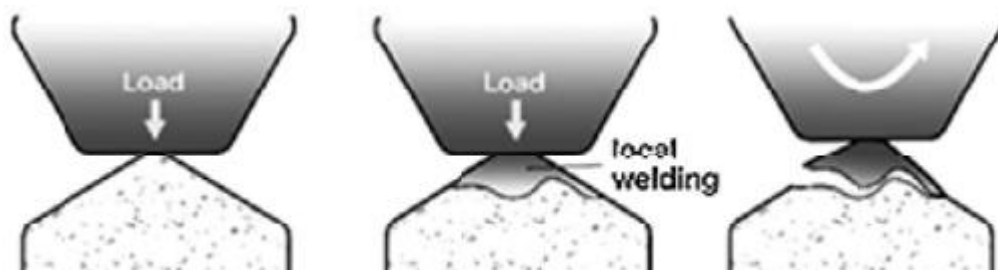


Figure I.14 : usure par adhésion

7.2.3. Usure par diffusion :

L'usinage à haute température, incluant des procédés tels que le fraisage, le tournage ou le perçage à grande vitesse, fait fréquemment appel au phénomène d'usure par diffusion comme mécanisme. Cela signifie que des particules du matériau travaillé sont déplacées vers l'outil à cause de la

chaleur intense générée au point de contact. Cette opération conduit à la création d'une couche d'usure constituée de métaux provenant aussi bien de l'outil que de la pièce, ce qui affecte le fil de coupe de l'outil et détériore la qualité de l'usinage. Ce phénomène peut également se produire dans d'autres processus qui requièrent une importante demande thermique, tels que le brochage ou le filetage. L'intensité de l'usure par diffusion dépend largement des propriétés des matériaux concernés et des paramètres de coupe (vitesse, profondeur, etc.). En résumé, il est recommandé d'utiliser des couches qui résistent à la diffusion, de définir précisément les conditions de coupe et d'employer des fluides de coupe efficaces afin de réguler la température dans la zone de coupe.

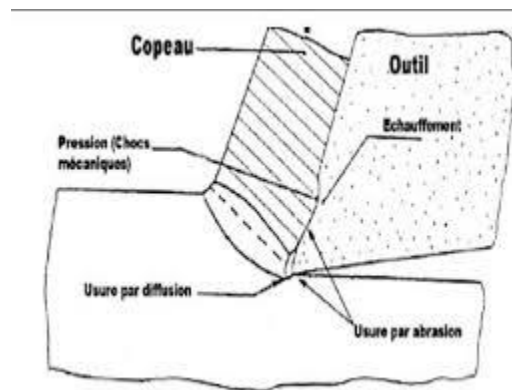


Figure I.15 : usure par diffusion

7.2.4. Usure par oxydation :

L'usure par oxydation survient à haute température, lorsque les surfaces métalliques réagissent avec l'oxygène de l'air ambiant pour former des couches d'oxyde. Ces films, d'abord minces, s'épaississent avec le temps par diffusion atomique. Toutefois, leur croissance est souvent irrégulière, conduisant à l'apparition de défauts tels que microfissures ou discontinuités. Sous l'effet des contraintes mécaniques et thermiques, ces défauts se propagent, provoquant la fragmentation des couches d'oxyde. Les particules ainsi détachées sont évacuées par le frottement, contribuant à l'usure des surfaces. Ce mécanisme est particulièrement impliqué dans l'usure en cratère et l'usure en arête, fréquemment observées dans des conditions d'usinage extrêmes.

L'usure oxydative peut altérer les performances des composants et raccourcir leur durée de vie. Sa maîtrise repose sur le choix de matériaux résistants à l'oxydation, l'optimisation des conditions d'usinage, et l'utilisation de revêtements protecteurs ou d'atmosphères contrôlées pour limiter les réactions chimiques en surface.

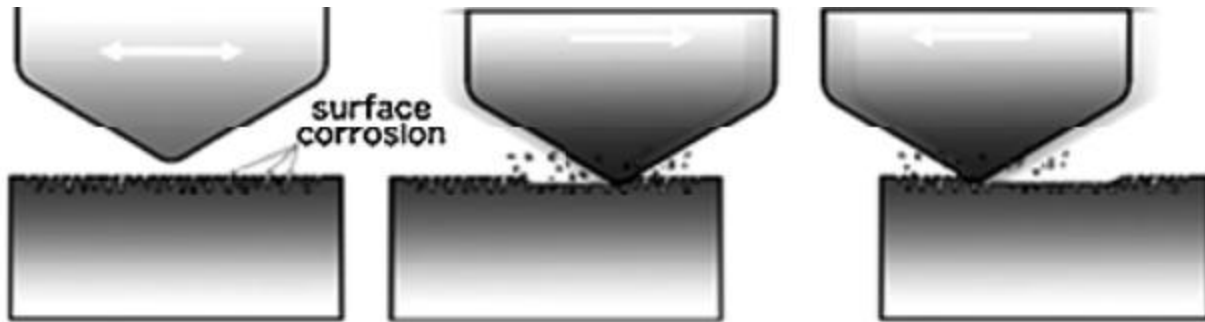


Figure I.16 :Usure par oxydation

7.2.5. Usure par déformation plastique :

L'assouplissement du matériau de coupe dû à une température excessive provoque la déformation plastique. Habituellement, plus l'argile présente une dureté et une épaisseur accrues, plus sa résistance à la déformation plastique est élevée.

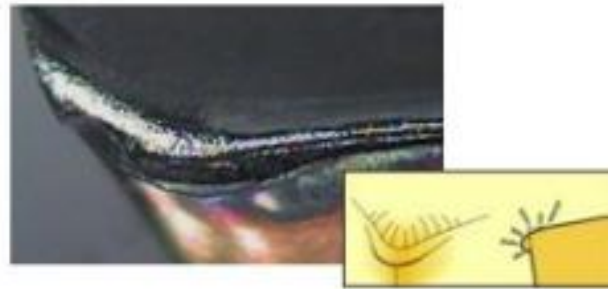


Figure I.17: usure par déformation plastique

7.3. Usure visible sur l'outil :

On distingue plusieurs types de dégradations d'outils, qui surviennent à divers emplacements sur l'instrument. Le type et la localisation de l'usure constatée sont affectés par les conditions d'opération, comme la charge, la vitesse, la température et le matériau en cours d'usinage.

7.3.1. Usure en dépouille

Cette détérioration, qui se manifeste sur la surface de dépouille, est due à l'abrasion (l'érosion) et à l'adhésion (l'accumulation de matière). Elle détériore la qualité de la surface et les dimensions. Le critère VB (Width of the crater) sert à estimer la durée de vie de l'outil. La modification des paramètres de coupe (vitesse, lubrification) améliore l'efficacité et allonge la durée de vie de l'instrument.

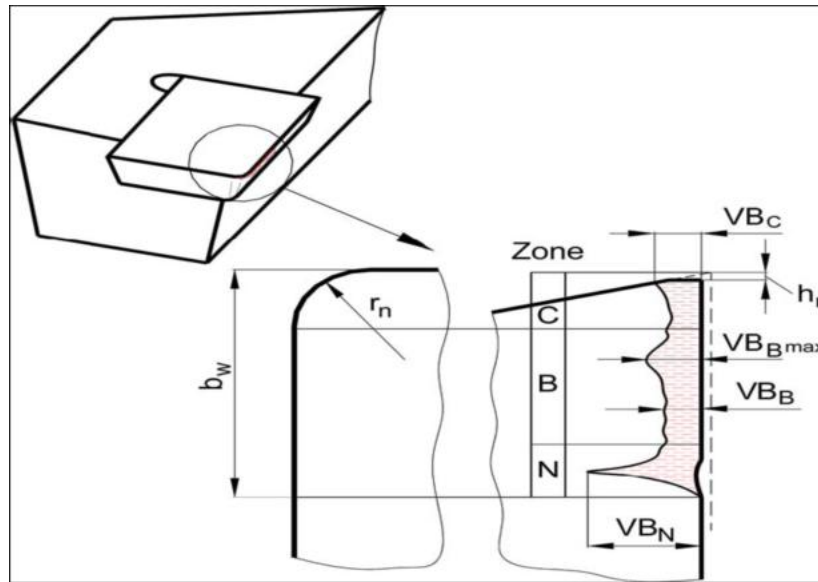


Figure I.18 :Caractéristiques d'usure en dévissage

7.3.2. Usure en cratère :

L'usure de cratère, fréquente en tournage, se forme sur la face de dévissage de l'outil, atteignant son maximum près du tranchant où la température est élevée. Elle limite la durée de vie de l'outil en affaiblissant le tranchant, pouvant causer sa rupture. Pour la contrôler, il faut optimiser. Il est nécessaire d'utiliser des outils recouverts ou des matériaux extrêmement durs, tout en réglant les paramètres de coupe (vitesse, avance). Ces actions renforcent la durabilité, étendent la durée de vie des instruments et préservent l'excellence et l'efficacité de la production.

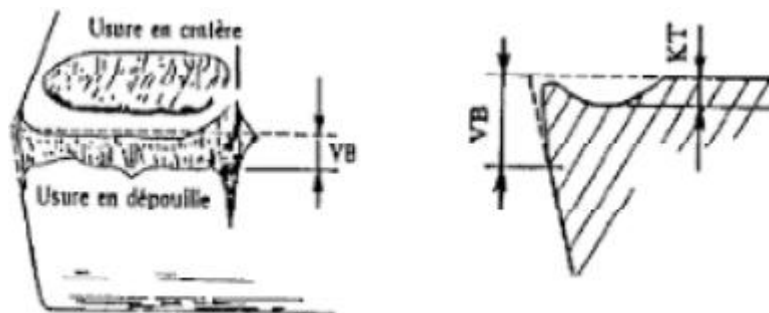


Figure I.19 : usure en cratère et dévissage

7.3.3. Usure en entaille :

Cette forme d'abrasion est caractérisée par une incision localisée tant sur le plan de coupe que sur le plan de dévissage, en termes de profondeur de coupe. Ceci est dû à l'adhésion (soudage par pression du copeau) et à la déformation. On retrouve souvent cela dans le travail des aciers inoxydables et des superalliages réfractaires.

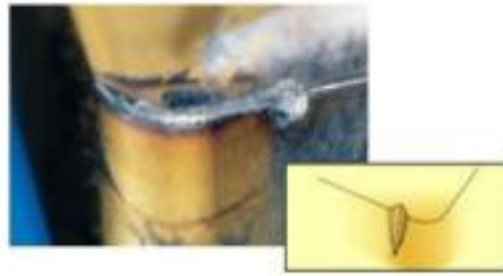


Figure I.20 : usure en entaille

7.3.4. Usure par écaillage et fissuration d'arête :

Lors d'un usinage soumis à des sollicitations cycliques ou à des chocs thermiques induits par une coupe non continue ou par des vibrations, on note l'émergence de fissures ou de dégradations sur le tranchant ou la surface de coupe. Ces derniers réduisent de manière significative la durée de vie de l'outil.

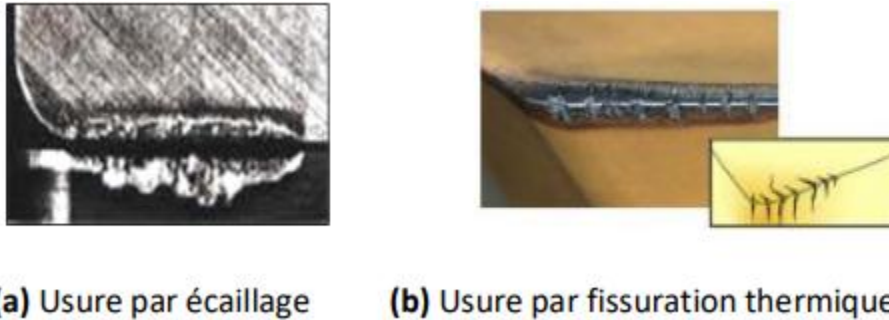


Figure I.21 : Usure par écaillage et fissuration d'arête

7.3.5. Usure par arête rapportée:

Ce type d'usure est provoqué par l'adhérence du copeau à la plaquette pendant le soudage à pression. Ce genre d'abrasion est courant avec les matériaux adhérents comme les aciers de basse teneur en carbone, les aciers inoxydables et l'aluminium. Une coupe à vitesse diminuée favorise l'émergence d'un bord rapporté.



Figure I.22 : Usure par arête rapportée

7.4. Relation entre usure et Temps:

La relation entre l'usure et le temps est généralement non linéaire et peut être divisée en trois phases principales (figure I.23):

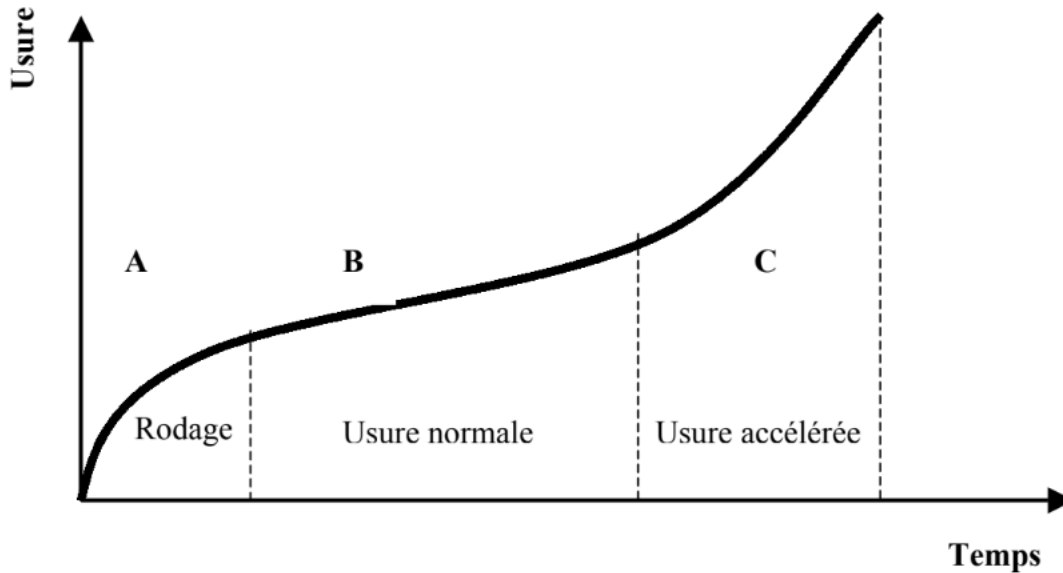


Figure I.23 :Evolution de l'usure en fonction du temps de coupe.

Zone A (phase initiale) :

Au début de l'usinage, l'outil subit une usure rapide due à l'ajustement initial et à l'élimination des micro-irrégularités de surface. Cette phase est courte.

Zone B (usure normale) :

L'usure évolue de manière linéaire ou quasi-linéaire avec le temps. C'est la phase où l'outil fonctionne de manière optimale, avec une usure régulière et contrôlée.

Zone C (Usure accélérée) :

Lorsque l'usure atteint un certain seuil, elle s'accélère rapidement, entraînant une dégradation brutale des performances de l'outil. Cette phase conduit à la fin de vie utile de l'outil.

Facteurs influençant la relation usure-temps :

Paramètres de coupe : Vitesse, avance, profondeur de passe.

Matériaux : Dureté et abrasivité de la pièce et de l'outil.

Conditions d'usinage : Lubrification, refroidissement, vibrations.

Importance :

La compréhension de ce lien facilite la prévision de la durée de vie des instruments, l'ajustement des paramètres de coupe et l'organisation des changements d'outils afin de réduire les dépenses et d'améliorer la productivité.

7.5. Critères d'usure :

Les différents critères actuellement utilisés se rangent en deux catégories.

7.5.1. Critères directs :

Basé sur le développement de l'usure, tels que :

- Le critère d'usure frontale est défini par la largeur moyenne VB de la bande d'usure sur la surface dégagée de l'instrument.
- Critère de formation du cratère déterminé par la profondeur maximale du cratère KT, ou par le seuil maximal du rapport de cratérisation KT/KM, ou par la limite supérieure de l'angle de création du cratère γ_c .
- Le critère de « mort d'outil » s'applique surtout aux outils en acier rapide.
- Le critère d'usure volumétrique ou massique se définit par la réduction du poids de l'outil, contrôlée soit par pesée, soit à l'aide de traceurs radioactifs.
-
- Le critère fondé sur les changements dimensionnels des surfaces usinées. On l'utilise actuellement pour évaluer l'usinabilité des aciers.

7.5.2. Critères indirects :

Ils sont basés sur la variation de certaines grandeurs physiques de la coupe en fonction de l'usure de l'outil, ce sont par exemple :

- Les efforts de travail spécifique de coupe ;
- La rugosité de surface usinée ;
- La température de coupe à la pointe de l'outil.

Les critères de durée d'outil recommandés par les normes ISO sont :

Les critères préférables pour les carbures et céramiques pour toutes conditions de coupe, en usinage d'acier ou fonte sont soit :

- ❖ La largeur de la bande d'usure frontale $[VB] = 0,3 \text{ mm}$ si elle est uniforme.
- ❖ La largeur maximale de cette bande $[VB_{\max}] = 0,5 \text{ mm}$ si elle est irrégulière.

Dans certains cas, on peut faire recours à des critères complémentaires telle que la profondeur KT du cratère pour les carbures métalliques qui se calcule d'après la formule $(KT = 0,1 + 0,3f) \text{ mm}$ où f est l'avance en mm/tr. [14]

7.6. Modèles de Lois d'usure:

Les modèles de lois d'usure sont des outils utilisés pour prédire l'évolution de l'usure des outils de coupe en fonction des conditions d'usinage. Voici une présentation des principaux modèles:

7.6.1. Modèle de TAYLOR:

Ce modèle établit un lien entre la durée de vie de l'outil et la vitesse de coupe. On l'utilise fréquemment pour évaluer la durée de vie des outils selon les critères de coupe.

La formule :

$$T = C_v * v_c^n$$

T : Durée de vie de l'outil (min).

C_v : Constante caractérisant le matériau usiné;

V_c : Vitesse de coupe donnée en m/min;

n : Coefficient directeur ou pente de la droite caractérisant le matériau de l'outil Valeurs admises : $-10 < n < -1$

7.6.2. Modèle de COLDING:

Ce modèle prend en compte non seulement la vitesse de coupe, mais aussi l'avance et la profondeur de passe, offrant une prédiction plus précise de la durée de vie de l'outil.

La

$$T = \frac{K}{V^a \cdot f^b \cdot ap^c}$$

formule :

- T : Durée de vie de l'outil (min).
- V: Vitesse de coupe (m/min).
- f: Avance (mm/tr).
- ap : Profondeur de passe (mm).
- K, a, b, c : Constantes expérimentales.

7.6.3. Modèle de KONING-DEPIEREUX (1969):

Ce modèle intègre le coefficient de frottement, ce qui permet de mieux prendre en compte les conditions d'interface outil-matière. Il est particulièrement utile pour les matériaux difficiles à usiner.

La formule :

$$T = \frac{C}{V^a \cdot f^b \cdot ap^c \cdot (1-\alpha)^d}$$

- T : Durée de vie de l'outil (min).
- V: Vitesse de coupe (m/min).
- f: Avance (mm/tr).
- ap : Profondeur de passe (mm).
- α : Coefficient de frottement.
- C, a, b, c, d: Constantes expérimentales.

7.6.4. Bilan des modèles d'usure:

Les modèles de lois d'usure sont des outils précieux pour l'optimisation des processus d'usinage. Le choix du modèle dépend des conditions spécifiques d'usinage et des matériaux utilisés.

- **Points** **communs :**
Tous ces modèles visent à relier les paramètres de coupe (vitesse, avance, profondeur de passe) à la durée de vie de l'outil. Ils reposent sur des constantes expérimentales spécifiques aux matériaux et aux conditions d'usinage.

- **Limites :**
Ces modèles sont souvent simplifiés et ne prennent pas en compte tous les facteurs influençant l'usure (vibrations, lubrification, géométrie de l'outil, etc.). Ils nécessitent des essais expérimentaux pour déterminer les constantes.
- **Utilisation :**
Ils sont principalement utilisés pour :
 - ❖ Prédire la durée de vie des outils.
 - ❖ Optimiser les paramètres de coupe.
 - ❖ Réduire les coûts de production.

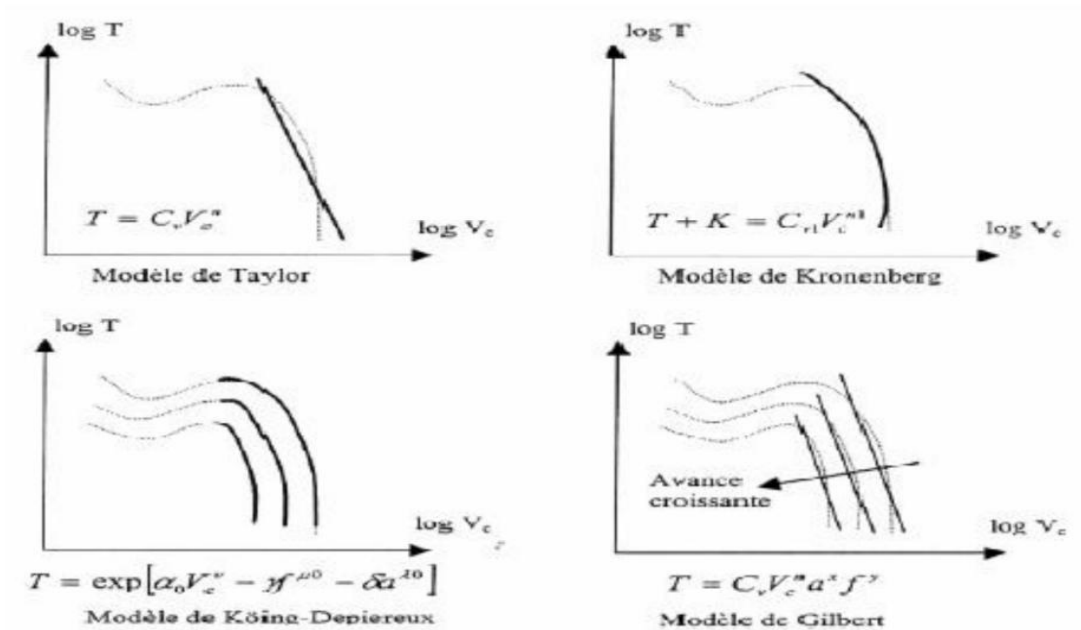


Figure I.24 : Représentation graphique des différents modèles

8. Rugosité des surfaces usinée :

8.1. Définition :

La rugosité est un critère essentiel dans la fabrication mécanique, car elle influence directement la fonctionnalité, la durabilité et l'esthétique des pièces produites. Elle se définit comme l'ensemble des irrégularités microscopiques présentes sur une surface après usinage, résultant des interactions entre conditions de coupe, l'outil de coupe et la matière usinée.

La rugosité est mesurée à l'aide de paramètres qui quantifient les écarts par rapport à une surface idéale. Une rugosité trop élevée peut entraîner des problèmes de frottement, de fatigue ou d'étanchéité, tandis qu'une rugosité trop faible peut augmenter les coûts de production sans apporter de bénéfices significatifs.

La rugosité des surfaces usinées est influencée par divers facteurs, y compris

- Les conditions de coupe (V_c , f , a_p).
- La géométrie de l'outil (r , α , γ , λ , χ_{r1} , χ_{r2})
- Les propriétés du matériau (dureté, ductilité).
- Les conditions d'usinage (vibrations, lubrification).

8.2. Principaux défauts de surface :

La capacité d'un élément à exécuter une fonction particulière dépend de plusieurs facteurs, y compris les caractéristiques de ses surfaces. Habituellement, les défauts de surface affectent considérablement un composant conçu pour une fonction spécifique. Ces défauts relèvent de la géométrie ou des propriétés physico-chimiques. Nous portons toute notre attention sur les anomalies géométriques, généralement classées en quatre niveaux (figure 25).

- **Défauts de 1^{ère} ordre** : il s'agit de défauts de forme (écarts de rectitude, écarts de circularité), défauts a périodique
- **Défauts du 2^{ème} ordre** ; Ils se distinguent par une ligne sinueuse de nature périodique, principalement due aux vibrations de basse fréquence générées par la pièce et l'outil. [6]
- **Défauts du 3^{ème} et 4^{ème} ordre** : Ils définissent la rugosité de la surface, les défauts du troisième ordre se composent de stries ou de sillons, ce genre de défaut possède une nature périodique ou pseudo-périodique. En revanche, les défauts du quatrième ordre comprennent des déchirures, des fissures, des perforations, etc. Ce genre de défaut présente un caractère a périodique. [6]

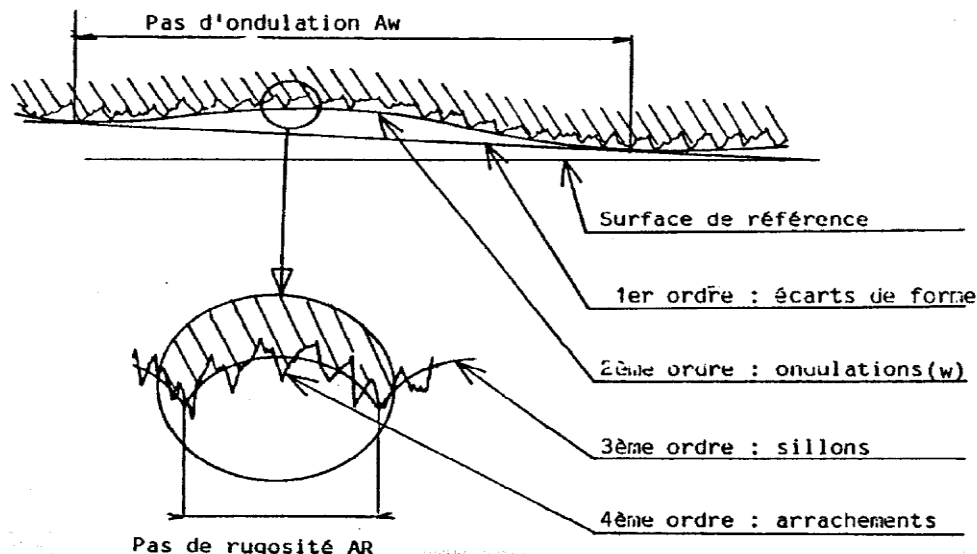


Figure I.25 : Principaux défauts de surface

8.3. Définition des critères de rugosité (norme NF E 05-015)

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage (figure I.26) [15, 16]:

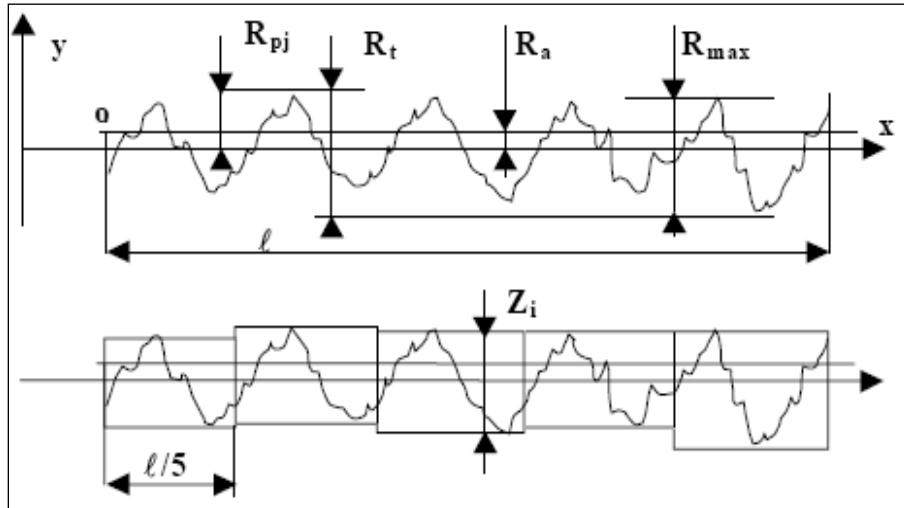


Figure I.26 :critères de rugosité

Soit OX la ligne moyenne telle que:

$$\int_0^l y dx = 0 \quad (I.9)$$

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne, soit:

- Rugosité moyenne arithmétique C.L.A, ou Centre Line Average, se réfère à la moyenne arithmétique des déviations (en termes absolus) par rapport à ox.[15, 16, 6].

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (I.10)$$

- Rugosité moyenne quadratique (Rq = R.M.S). (Root Mean Square). Ce critère (non normalisé en France) représente l'écart moyen quadratique par rapport à ox [15, 16].

$$RMS = \left[\frac{1}{l} \int_0^l y^2 dx \right]^{1/2} \quad (I.11)$$

- Rugosité totale R_{max} : elle représente la hauteur maximale des aspérités du profil de rugosité.

- Rugosité totale R_t : elle illustre l'écart entre la saillie et le sommet de la rugosité [17].

$$R_t = \frac{f^2}{8r} \quad (I.12)$$

- Rugosité R_p : Elle indique l'amplitude maximale de la rugosité. R_p représente l'écart entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur (L), elle illustre l'écart entre la saillie et le sommet de la rugosité.

- Rugosité totale R_z : Elle indique la différence totale entre le point le plus élevé et le point le plus abaissé du profil, mesurée sur toute la longueur de palpage ℓ . [15, 16].

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_1^5 Z_i \quad (I.13)$$

Dans les conditions de nos essais, le travail de la pointe de l'outil se passe toujours dans le rayon de bec de la plaquette. L'avance utilisée sera toujours inférieure à R_ϵ .

On considérera les modèles théoriques suivants:

$$R_{théorique} = f^2 / 8R_\epsilon \quad \text{et} \quad Ra = f^2 / 18\sqrt{3}.R_\epsilon \quad \text{quand } f \ll R_\epsilon d \quad (I.14)$$

8.4. Influence des principaux paramètres de coupe :

Le tableau 2 représente l'influence des principaux paramètres de coupe sur la rugosité en tournage.

Tableau 2:Influence des paramètres de coupe sur la rugosité.

Paramètres d'usinage	Variation de la rugosité
Dureté du matériau usiné ↑	↓
Avance f ↑	↑
Rayon du bec d'outil r_ϵ ↑	↓
Profondeur de passe ↑	↑
Usure de l'outil ↑	↑
Lubrification ↑	↓
Vitesse de coupe ↑	↓

Vitesse de Coupe (V_c):

Effet:

- Une vitesse de coupe élevée réduit généralement la rugosité en :
 - Limitant les vibrations.
 - Améliorant l'écoulement du copeau.
- Une vitesse de coupe trop faible peut augmenter la rugosité en favorisant l'usure par frottement et en générant des copeaux mal évacués.

Avance (f):

- **Effet :**
 - Une avance élevée augmente la rugosité en créant des marques régulières (stries) sur la surface, dues au déplacement de l'outil.
 - Une avance faible réduit la rugosité en produisant des surfaces plus lisses, mais peut augmenter le temps d'usinage et l'usure de l'outil.

Profondeur de Passe (ap)

- **Effet :**
 - Une profondeur de passe élevée augmente les forces de coupe et les vibrations, ce qui peut entraîner une rugosité accrue.
 - Une profondeur de passe faible réduit la rugosité mais peut prolonger le temps d'usinage.

Géométrie de l'Outil:

- **Effet :**
 - Un rayon de bec important réduit la rugosité en améliorant l'écoulement du copeau et en répartissant les forces de coupe.
 - Un angle de coupe approprié minimise les vibrations et l'usure, contribuant à une meilleure qualité de surface.

Lubrification et Refroidissement:

- **Effet :**
 - Une bonne lubrification réduit la friction et la température, limitant ainsi l'usure de l'outil et améliorant la qualité de surface.
 - Un refroidissement efficace évite les déformations thermiques et les défauts de surface.

Dureté du Matériau Usiné:

- **Effet :**
 - Les matériaux durs (comme les aciers trempés ou les superalliages) sont plus difficiles à usiner et génèrent une rugosité plus élevée en raison des forces de coupe importantes et de l'usure accélérée de l'outil.
 - Les matériaux tendres (comme l'aluminium) permettent généralement une meilleure finition de surface, mais peuvent provoquer des dépôts adhésifs (BUE) si les paramètres de coupe ne sont pas adaptés.

Usure de l'Outil:

- **Effet :**
 - Une usure en dépouille (VB) augmente les forces de coupe et les vibrations, ce qui dégrade la qualité de surface.
 - Une usure en cratère (KT) modifie la géométrie de l'outil, affectant l'écoulement du copeau et augmentant la rugosité.
 - Une usure par adhésion (BUE) provoque des irrégularités sur la surface usinée.

9. Formation du copeau :

9.1. Introduction :

L'emploi des trois critères : le coût, la qualité et le délai de livraison requiert l'adoption de méthodes de production plus efficaces et adaptables. La formation du copeau lors de l'usinage à grande dureté (tournage à haute vitesse) est un phénomène micro-géométrique qui affecte plusieurs éléments macro-géométriques à surveiller attentivement. L'administration sous sa direction participe à :

- Fiabiliser le processus d'usinage .
- Garantir la qualité géométrique des surfaces usinées (état de surface et précision dimensionnelle) .
- Assurer la productivité.
- Renforcer la sécurité des opérateurs et la cellule d'usinage.

9.2. Mécanisme de la formation du copeau :

Le phénomène de formation du copeau implique plusieurs facteurs, tels que la rhéologie du matériau travaillé, le type de contact entre l'outil et la matière, ainsi que les divers paramètres d'usinage. Pour comprendre les différentes dynamiques impliquées dans un processus de coupe, une analyse locale extrêmement précise est nécessaire. Certaines manifestations ont été mises en évidence grâce à des expériences. On peut mentionner parmi ces techniques expérimentales :

- La Méthode de visualisation et d'investigation métallographique des essais de coupe brusquement interrompue (quick stop) [7].
- Le Procédé de microcinématographie qui permet de visualiser la formation du copeau.

Les observations micrographiques mettent généralement en évidence la présence de 5 zones lors de la formation du copeau (figure I.27) [8].

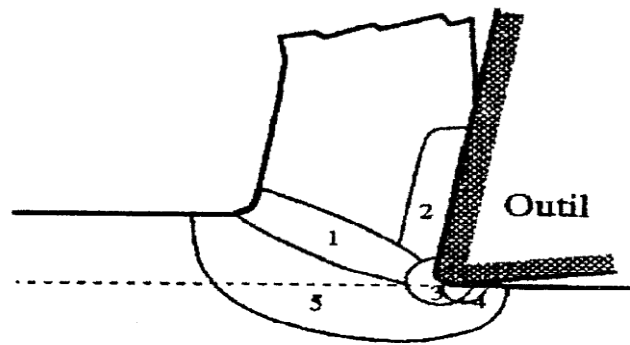


Figure I.27 :Principales zones de cisaillement du copeau

Zone 1 : Cisaillement primaire (Zone de déformation intense) :

La matière subit un changement brutal de direction sous l'action de l'outil. Cette zone est caractérisée par:

- Un cisaillement extrême du matériau
- Une élévation importante de température due aux frottements internes
- La formation initiale du copeau par déformation plastique

Zone 2 : Frottement copeau-outil (Zone de cisaillement secondaire) :

Le copeau nouvellement formé entre en contact avec la face de coupe de l'outil :

- Double effet : cisaillement supplémentaire + frottement intense
- Génération de chaleur concentrée à l'interface
- Influence directe sur l'usure de l'outil

Zone 3 : Séparation matière (Zone critique du tranchant) :

Au niveau de la pointe de l'outil se produit :

- Une compression extrême du matériau
- La séparation définitive entre copeau et pièce
- Formation éventuelle d'arêtes rapportées (effet de chanfrein)

Zone 4 : Interaction pièce-outil (Zone de dépouille) :

La face inférieure de l'outil agit sur la pièce usinée :

- Frottements moins intenses qu'en Zone 2
- Impact direct sur l'état de surface
- Sollicitation mécanique de la matière restante

Zone 5 : Déformations résiduelles (Zone d'influence thermomécanique) :

La matière en amont de l'outil subit :

- Des déformations plastiques et élastiques
- La création de contraintes résiduelles
- Des modifications microstructurales

9.3. Les différents types de copeaux :

9.3.1. Définition de copeau :

Le copeau est la portion de matériau qui se sépare lors de l'opération de coupe dans un processus d'usinage. L'état de la surface travaillée est conditionné par les conditions de coupe. Il y a un seuil minimal à ne pas franchir pour éviter de manquer une formation de copeau. Cet écart minimal varie en fonction du matériau, de la vitesse et du genre d'outil employé, et constitue le copeau minimal. Si l'avance est réduite, on ne parle plus de coupe, mais d'écrouissage qui génère une chaleur nuisible à la qualité de surface de la pièce et à l'outil.



Figure I.28 :copeau

9.3.2. Les types de copeaux

Pour les métaux, le processus de formation du copeau est principalement basé sur des déformations plastiques. Selon les conditions de coupe, on rencontre trois familles de copeaux :

- **Le copeau continu** : la continuité du matériau y est préservée, et les déformations plastiques dans les zones de cisaillement sont quasi stationnaires.
- **Le copeau segmenté** : il est composé d'éléments plus ou moins connectés entre eux, résultant de variations périodiques de la couche superficielle ; ce qui conduit à des zones alternées de déformations locales très peu cisailées.

- **Le copeau dentelé** : il est en majorité formé d'éléments séparés, dus plutôt à une rupture du matériau qu'à un cisaillement de celui-ci. [9]

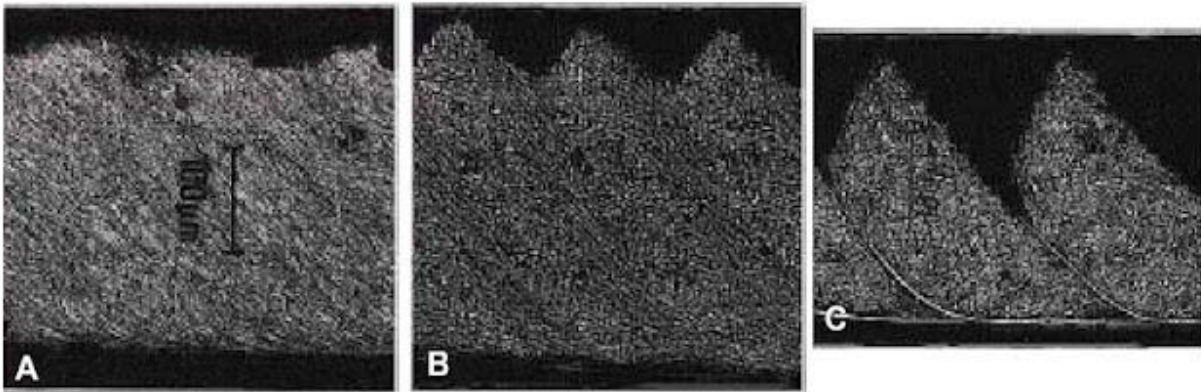


Figure I.29 :Formes de copeau A : copeau continu ; B : copeau segmenté ; C : copeau dentelé

9.4. Influence de la vitesse de coupe :

Une élévation de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier entraîne une transformation du copeau qui tend à se briser progressivement, voire à se réduire en poussière lorsque les vitesses atteignent des niveaux extrêmement élevés. Le copeau présente une apparence similaire à celle que l'on pourrait voir lors de l'usinage de la fonte. Le graphique I.30 ci-dessous, tiré du rapport de Leroy [10], illustre la transformation morphologique du copeau en relation avec la vitesse de coupe.

Dans l'usinage à grande dureté, le copeau se fragmente de manière régulière. Cela est dû à un phénomène périodique de cisaillement adiabatique qui cause la fragmentation du copeau. Ce phénomène de cisaillement se manifeste d'autant plus à des vitesses réduites lorsque le matériau travaillé est dur, essentiellement en raison des caractéristiques thermiques de ces matériaux qui favorisent un réchauffement dans la zone de cisaillement et par conséquent une altération des propriétés mécaniques dans cette même zone.

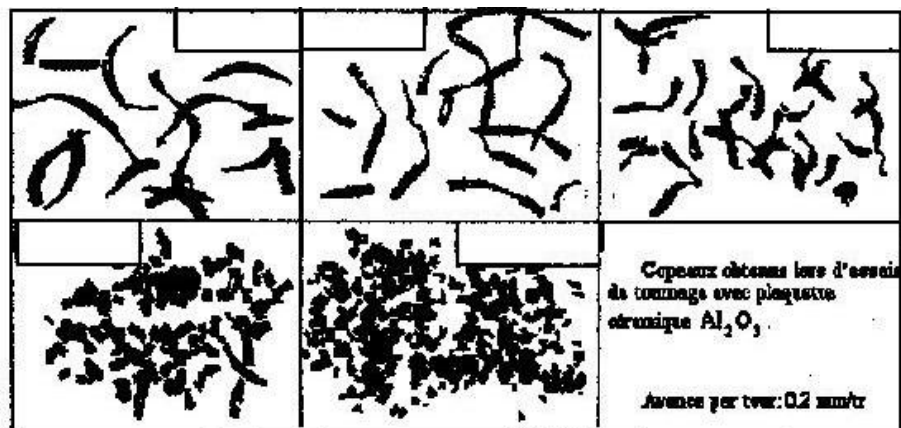


Figure I.30 :Morphologie du copeau en fonction de la vitesse de coupe

10. Chaleur et température :

10.1. Introduction :

La coupe des métaux à grande vitesse est associée aux températures élevées, et par conséquent les aspects thermiques du processus de coupe affectent fortement exactitude du processus usinage. Les températures élevées produites dans les zones de déformation ont des conséquences graves pour l'outil et la pièce à usiner. La température de coupe influence

fortement intégrité de surface de la pièce à usiner, le mécanisme de formation de copeau contribue à la déformation thermique de l'outil de coupe.

10.2. Importance de la température :

La température de coupe désigne la chaleur produite au niveau de l'interaction entre le copeau et l'instrument. Edward Herbert, le premier à établir la loi qui porte son nom, a souligné l'importance capitale de la température de coupe dans l'usure des outils : « L'usure du tranchant de l'outil est exclusivement liée à la température de coupe. » Effectivement, toutes les procédures qui provoquent l'usure (le frottement, l'abrasion, la corrosion chimique, la diffusion) sont grandement affectées par la température. C'est la raison pour laquelle les relations notées entre l'usure de l'outil et la température de coupe tendent généralement vers une progression exponentielle.

$$VB = K \theta^n \quad (\text{loi de SCHALLBROCH et SCHAUMANN})$$

Entre la température de coupe et la vitesse de coupe, on a trouvé d'autres relations, comme :

$$\theta = C V^n \quad (\text{GOTTWEIN})$$

$$\theta = C V + \text{constante} \quad (\text{O.W. BOSTON})$$

10.3. Origine de la chaleur :

Au cours de l'opération de coupe, la pièce, l'instrument de coupe et le copeau se réchauffent, ce qui signifie que la température s'élève dans la région de coupe. Cela est attribuable à la conversion de l'énergie mécanique due à la déformation élastique et plastique ainsi qu'au frottement du copeau contre les surfaces d'attaque et de dépouille de l'outil en énergie thermique.

$$Q = Q_{fr\gamma} + Q_{fr\alpha} + Q_{d\acute{e}f}$$

Si on considère un outil entraîné de couper, on distingue 4 zones (figure I.30):

- **Zone 1** : zone de frottement copeau-outil (face d'attaque) : génération de chaleur.
- **Zone 2** : bec de l'outil (arête rapportée ou zone morte : stable ou instable)
- **Zone 3** : zone de frottement outil-pièce (face en dépouille) : génération de chaleur.
- **Zone 4** : zone de déformation et de cisaillement. Une élévation de température se produit dans la masse du copeau et peut être transféré à l'outil et à la pièce.

Les zones 1 et 2 sont les lieux où se produisent des frottements importants. Ces frictions entraînent une augmentation significative de la température dans les régions de contact, conduisant à la formation d'un plasma à l'interface des deux entités.

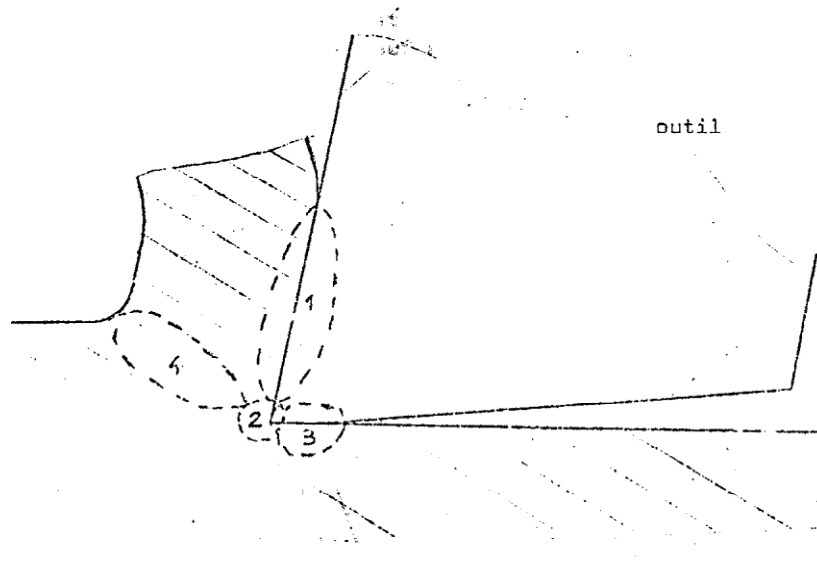


Figure I.31 :Schéma des zones de dégagement de chaleur.

10.4. Répartition de la chaleur entre outil, copeau et pièce :

L'instrument, l'échantillon et l'élément usiné génèrent une dispersion de chaleur qui découle du frottement entre l'échantillon et l'instrument, ainsi que de la déformation plastique au sein de l'échantillon et de l'élément. Le copeau joue un rôle crucial dans l'évacuation de la chaleur produite par la déformation plastique au niveau du plan de cisaillement. Une portion est dispersée par le biais du rayonnement, alors qu'une autre est conduite vers l'élément usiné par conduction. Quant à la chaleur issue du frottement copeau-outil, elle se répartit entre le copeau et l'outil selon une loi proposée par CHARRON pour deux corps en contact de frottement.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\sqrt{K_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1}}{\sqrt{K_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2}}$$

K: conductibilité thermique;

C: chaleur spécifique;

ρ : densité;

1,2: indices relatifs aux corps 1 ou 2.

Dans l'atelier, la chaleur se manifeste essentiellement à cause de l'écrouissage du métal pendant le processus d'usinage. L'étendue de cet écrouissage se base sur la vitesse de coupe et l'avance. À des vitesses de coupe élevées, l'épaisseur de la couche durcie diminue, alors qu'à une vitesse basse, elle peut atteindre une épaisseur similaire à celle de la passe - par exemple, dans le cas d'un acier extra-doux. Ce phénomène produit de la chaleur qui se propage ensuite dans la pièce par conduction.

Des études calorimétriques de la coupe, menées par plusieurs chercheurs, ont permis de déterminer la répartition de la chaleur entre l'outil, le copeau, la pièce usinée et l'air ambiant.

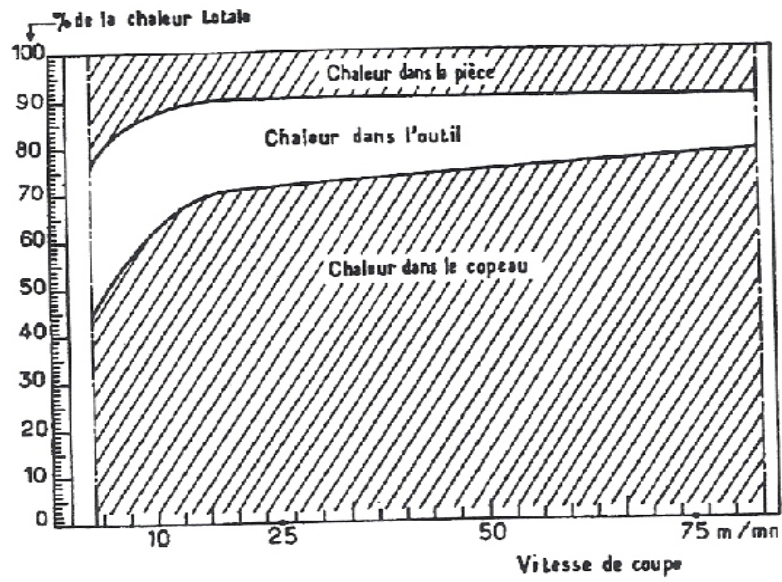


Figure I.32 : Répartition de la chaleur entre outil, copeaux et pièce.

11. Les efforts de coupe:

11.1. Définition:

Dans le processus d'usinage, les forces mécaniques produites lors de l'interaction entre l'instrument de coupe et la pièce à travailler sont appelées efforts de coupe. Ces efforts sont principalement dus à la déformation plastique du matériau et à l'abrasion entre le copeau et l'instrument. Ils sont divisés en trois éléments orthogonaux (figure I.33) :

F_v : Dans le contexte de la vitesse de coupe, on parle d'effort tangentiel ou effort principal de coupe. Il s'agit de la valeur qui a le plus grand impact absolu.

F_a : Dans le contexte du tournage, on parle de composante d'avance, aussi appelée effort d'avance ou effort axial.

F_r : Composante dans une direction orthogonale aux deux autres, également connue sous le nom d'effort de refoulement ou effort radial.

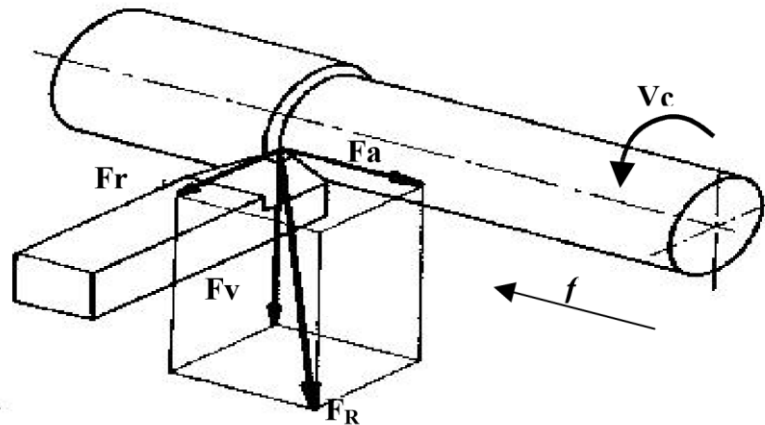


Figure I.33 : Composantes de l'effort de coupe.

11.2. Influence des différents facteurs sur les efforts de coupe :

L'effort de coupe est étroitement lié aux paramètres suivants qui ont une influence plus ou moins importante.

11.2.1. Les éléments du régime de coupe :

a) Vitesse de coupe :

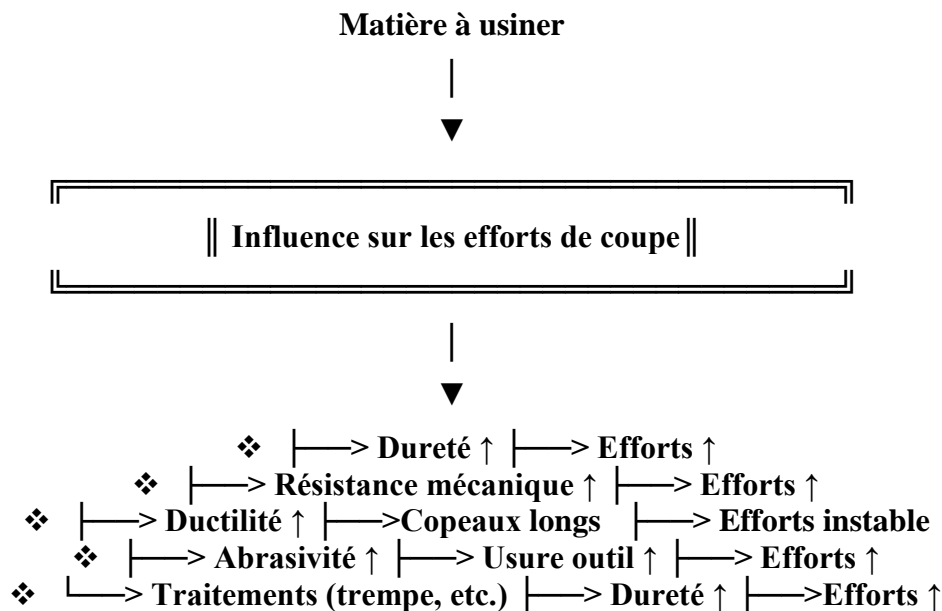
C'est le facteur le plus important dont l'influence est déterminante sur la valeur des efforts de coupe. très basse vitesse, ces efforts diminuent en raison d'une réduction du frottement entre le copeau et l'outil. Ensuite, la formation d'une arête rapportée entraîne une augmentation progressive de l'effort, atteignant un maximum. Au-delà de ce point, les efforts diminuent à nouveau à mesure que l'arête rapportée disparaît. Cette réduction à grande vitesse s'explique par la baisse du frottement copeau-outil, elle-même due à l'élévation de la température aux interfaces copeau-outil et outil-pièce, ainsi qu'à la formation d'un cratère sur la face de coupe de l'outil.

b) Avance et profondeur de passe :

L'augmentation de l'avance et de la profondeur de passe entraîne une croissance de la section du copeau, ce qui se traduit par une hausse de l'effort requis pour l'enlèvement de matière.

11.2.2. Matière à usiner :

Les propriétés mécaniques du métal à usiner influent fortement sur la force de coupe. Cette dernière augmente quand la résistance à la rupture augmente. Quand la dureté du matériau augmente, les efforts de coupe augmentent. De même, si la résistance mécanique du matériau est élevée, les efforts de coupe augmentent aussi. Lorsque le matériau est très ductile, il forme des copeaux longs, ce qui rend les efforts de coupe instables. Si le matériau est abrasif, il use plus vite l'outil, ce qui augmente encore les efforts de coupe. Enfin, si le matériau a subi un traitement thermique comme la trempe, sa dureté est plus élevée, donc les efforts de coupe deviennent plus importants.



11.2.3. Liquide de lubrification et de refroidissement :

L'emploi de lubrifiants lors de l'usinage contribue à minimiser le coefficient de friction, à dissiper la chaleur, à contrôler la création d'arêtes ajoutées et à perfectionner la qualité de la surface. Ces effets conjugués peuvent entraîner une réduction significative de la force de coupe, pouvant atteindre jusqu'à 25 %.

11.3. Mesure des efforts de coupe :

De nombreuses techniques expérimentales ont été développées pour analyser les forces de coupe. La mesure de ces efforts repose principalement sur l'utilisation de dynamomètres, qui évaluent la déformation élastique d'un élément de rigidité maîtrisée dans le système de mesure. Parmi les technologies les plus répandues aujourd'hui, les dynamomètres piézoélectriques occupent une

place essentielle. Ils sont largement utilisés en recherche expérimentale en usinage, mais aussi dans l'industrie pour la surveillance en temps réel des outils de coupe. La majorité de ces systèmes permettent la mesure simultanée de plusieurs composantes de l'effort.

Pour conclure sur ce point concernant les efforts de coupe, on peut dire d'une manière générale, que la tendance est de minimiser les efforts de coupe lors de l'usinage des pièces. Ceci conduit à :

- Un faible fléchissement de la pièce, ce qui augmente la précision géométrique.
- A une consommation moindre de la puissance développée par la machine-outil.
- Des faibles déformations statiques et dynamiques du système usinant MODOP.
- Améliore l'état de surface des pièces usinées. [10]

12. Les vibrations :

12.1. Définition:

La vibration est un phénomène mécanique se caractérisant par des oscillations autour d'un point d'équilibre. Ces variations peuvent être périodiques, à l'instar des mouvements d'un pendule, ou bien aléatoires, comme le comportement d'un pneu sur une route en gravier.

Il arrive que les vibrations soient désirables. Par exemple, un téléphone mobile fonctionne bien avec le son qui est produit par la vibration de l'air. Toutefois, les vibrations sont plus souvent une source de perte d'énergie, car elles engendrent des déformations et un bruit non souhaité. Pour illustrer, la majorité des vibrations générées par les moteurs traditionnels, électriques et autres équipements mécaniques en marche sont non souhaitées. Des vibrations peuvent être causées par des composants tels que des pièces tournantes déséquilibrées, des frottements inégaux, l'engrènement des dents d'un pignon ou d'une couronne et autres éléments, une situation généralement minimisée par des conceptions prudentes [11]. On fait la distinction :

12.2. Les types des vibrations :

- **Vibrations naturelles (ou libres) :**

La vibration libre a lieu quand une perturbation initiale déclenche une oscillation dans un système mécanique, qui ensuite vibre de manière autonome. On peut établir un parallèle entre ce phénomène et celui qui se manifeste lorsque l'on tire sur une balançoire pour enfant et qu'on la lâche. Le dispositif mécanique vibre à une ou plusieurs de ses « fréquences naturelles », puis cette vibration s'atténue progressivement jusqu'à atteindre zéro.

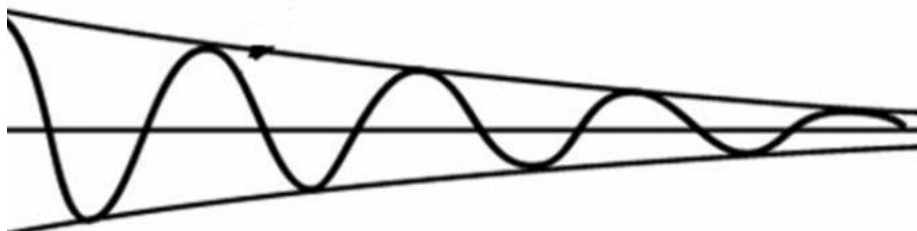


Figure I.34 :vibration

- **Vibrations forcées :**

Les vibrations forcées sont principalement engendrées par les défauts d'excentration broche/outil/dents, les interruptions de la coupe (inévitables en fraisage par exemple), ainsi que par des sources extérieures à la machine.

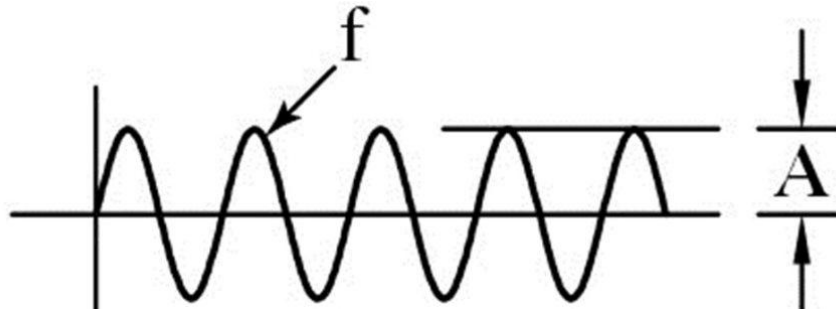


Figure I.35 : Les vibrations forcées (f = fréquence et A = amplitude)

- **Vibrations auto-entretenues (ou auto-excitées / instables) :**

Les vibrations auto-entretenues sont associées au phénomène selon lequel l'épaisseur d'un copeau est influencée non seulement par la position actuelle de l'arête de coupe en relation avec la pièce, mais également par sa position lors du précédent passage. Ceci peut donner lieu à des vibrations qui s'intensifient à chaque mouvement de l'outil jusqu'à atteindre un niveau susceptible d'altérer la qualité de la surface usinée.[12]

12.3. Origine des vibrations en tournage :

Les machines-outils, les pièces à usiner et les outils ne sont pas totalement rigides et les forces de coupe peuvent provoquer des vibrations. Les performances d'usinage peuvent être restreintes par les propriétés dynamiques de la machine, de la pièce et de l'outil de coupe. Une rigidité inadéquate, ou un amortissement des vibrations insuffisant, peut causer des soucis de vibrations auto-excitées ou de « broutage ». Avec une compréhension des principes de base du phénomène, on peut anticiper les vibrations, ce qui contribue à optimiser les performances en usinage.[12]

a) Paramètres technologiques mal choisis

- Avance trop élevée,
- Profondeur de passe excessive,
- Vitesse de coupe mal adaptée → excitation des fréquences propres.

b) Rigidité insuffisante

- Pièce ou outil trop longs et fins → effet "porte-à-faux",
- Fixation inadéquate (mauvais bridage),
- Défaut d'alignement ou jeu dans les glissières de la machine.

c) État de l'outil

- Outil usé ou cassé,

- Arête rapportée.

d) Conditions de coupe

- Matière difficile à usiner,
- Lubrification insuffisante.

12.4. Effets des vibrations

Les vibrations ont des conséquences importantes :

- Rugosité élevée de la surface (motif en "ondulations"),
- Usure prématurée de l'outil,
- Diminution de la précision dimensionnelle,
- Bruit et inconfort pour l'opérateur,
- Parfois : rupture de l'outil ou de la pièce.

12.5. Prévention et réduction des vibrations

Voici plusieurs solutions pour minimiser ou éliminer les vibrations en tournage :

a) Choix optimal des paramètres de coupe

- Réduire l'avance ou la profondeur de passe,
- Augmenter la vitesse de coupe pour sortir des fréquences critiques (parfois).

b) Augmenter la rigidité du système

- Utiliser des outils courts et robustes,
- Optimiser le bridage de la pièce,
- Utiliser des porte-outils anti-vibratoires

c) État de l'outil

- Changer régulièrement l'outil,
- Choisir un revêtement ou une géométrie adaptée au matériau.

d) Utilisation de lubrification

- MQL (Minimum Quantity Lubrication) ou lubrification à haute pression → refroidissement et amortissement partiel.

Chapitre II : Equipements utilises et procédure expérimentale

1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des outils et dispositifs mis en œuvre dans le cadre d'une démarche expérimentale rigoureuse visant à caractériser le comportement des matériaux de coupe, qu'ils soient en carbure revêtu ou non revêtu, lors de l'usinage du matériau C30. L'objectif est de décrire le matériel utilisé pour étudier l'évolution de l'usure des outils, ainsi que la rugosité des surfaces usinées, en fonction de différentes conditions d'usinage.

2. Equipements utilises :

2.1. Machine outil :

La machine-outil utilisée pour nos essais est un tour universel de marque TOS TRENCIN, modèle SN40, fabriqué en République tchèque. Elle affiche un poids de 1720 kg et est équipée d'un moteur électrique d'une puissance de 6,6 kW. Ce tour offre une plage de vitesses de rotation comprise entre 22,4 et 2000 tr/min, ainsi qu'une gamme d'avances allant de 0,08 à 6,4 mm/tr. Il se distingue par une distance entre pointes de 1500 mm. Sa contrepointe est dotée d'un fourreau mesurant 120 mm de longueur pour un diamètre de 70 mm.



Figure II.1 :tour parallèle modèle SN40

2.2. Matière a usiner :

Les essais prévus seront réalisés sur des éprouvettes en acier au carbone de nuance C30. La composition chimique de cet acier est présentée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3 :Composition chimique de l'acier C30.

Désignation du matériau	Composition Chimique (% en masse)											
	C	Mo	V	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	AL	Sn	P	S
C30	0.32	1.62	0.41	0.37	0.32	0.30	0.166	0.08	0.026	0.021	0.019	0.015

2.3. Plaquettes et porte a outils :

2.3.1. Description des plaquettes :

Les plaquettes (figure 2) choisies sont réversibles, de marque sandvik et widia comportant 8 arêtes de coupe par plaquette. Leurs caractéristiques sont répertoriées dans le (tableau 2).



Figure II.2 :plaquettes de coupe utilisées La plaquette grise est sans revêtement et l'autre revêtue avec un triple revêtement

Tableau 4:Descriptifs des plaquettes utilisées

Matériau de coupe	Désignation		Géométrie	Marque	Composition
	Firme	ISO			
Carbure non revêtu	TTR	P35	SNMA 12.04.08	Widia	85% WC+5% TiC+10% Co
Carbure revêtu	GC4015	P15	SNMG 12.04.08	Sandvik coramant	WC avec un triple revêtement TiN+ Al ₂ O ₃ + TiCN

P35 (TTR) : Il s'agit d'un métal dur tenace, spécialement conçu pour les opérations d'ébauche sur les aciers, les aciers moulés ainsi que les aciers inoxydables.

GC4015 (P15, K15) : Cette nuance est revêtue d'un dépôt CVD multicouche d'environ 14 µm, composé de TiCN, Al₂O₃ et TiN (figure II.3). Ce revêtement doré, en plus de faciliter la détection de l'usure, confère à l'outil une excellente résistance à l'abrasion. Le substrat sous-jacent est dur et présente un gradient de dureté en surface, ce qui permet à la nuance de supporter des températures de coupe élevées tout en maintenant une bonne stabilité de l'arête de coupe. La GC4015 est une nuance hautement performante, parfaitement adaptée aux usinages à sec et aux

vitesse de coupe élevées dans le domaine P15. Elle constitue également un excellent choix pour l'usinage des fontes grises et nodulaires.

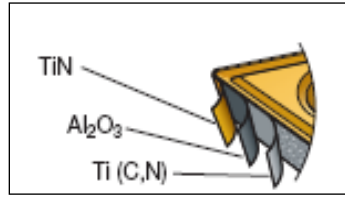


Figure II.3 :Carbure GC4015 à triple revêtement.

2.3.2. Porte plaquette :

Dans le cadre des tests, nous avons employé un support de plaquette de type Sandvik, avec des plaquettes fixées mécaniquement par un trou central (figure II.4). Le tableau 5 fournit la géométrie du porte plaquette.

Tableau 5 :Caractéristiques géométriques du porte plaquette

Porte plaquette	Section mm ²	χ°	α°	γ°	λ°
PSBNR2525M12	25×25	75	6	-6	-6



Figure II.4: porte outil utilisée

2.4. Microscope pour la mesure de l'usure :

Le suivi de l'évolution de l'usure des plaquettes testées, en fonction du temps et des conditions de coupe, a été réalisé à l'aide d'un microscope optique de modèle **MMN-2** (figure 5), offrant une précision de 5 μm . Cet appareil est équipé d'une table à mouvements croisés, permettant la mesure précise des largeurs et longueurs des différentes zones d'usure, qu'elles se situent sur la face de dépouille ou sur la face d'attaque .



Figure II.5 :Microscope pour la mesure de l'usure.*

Le principe de mesure consiste à orienter la zone d'usure de la plaquette face à l'objectif du microscope. Son positionnement est assuré à l'aide d'un cadran mobile équipé d'un repère de coordonnées X et Y.(figure II.6)

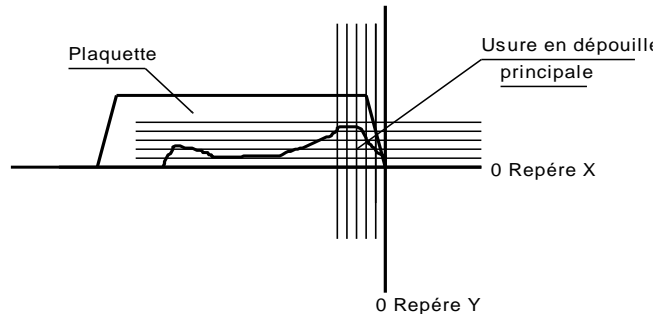


Figure II.6 :Principe de mise en position de la zone d'usure de la plaquette.

2.5. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité :

La topographie de surface de la pièce usinée est caractérisée à l'aide d'un rugosimètre portable de marque Mitutoyo (figure II.7.a). Cet appareil présente les caractéristiques suivantes :

- Résolution : $0,1 \mu\text{m}$
- Filtre appliqué : 0,8
- Avance utilisée : $2,5 \times 5''$



Figure II.7 :Mesure de topographie in situ avec le rugosimètre portable Mitutoyo.

La mesure de la rugosité est réalisée directement sur la même machine et sans démontage de la pièce (figure II.8.b).

2.6. Modes de fixation des ébauches:

Les éprouvettes utilisées (montage mixte) pour la réalisation des essais d'usure de rugosité sont représentées respectivement sur la (figure 9).

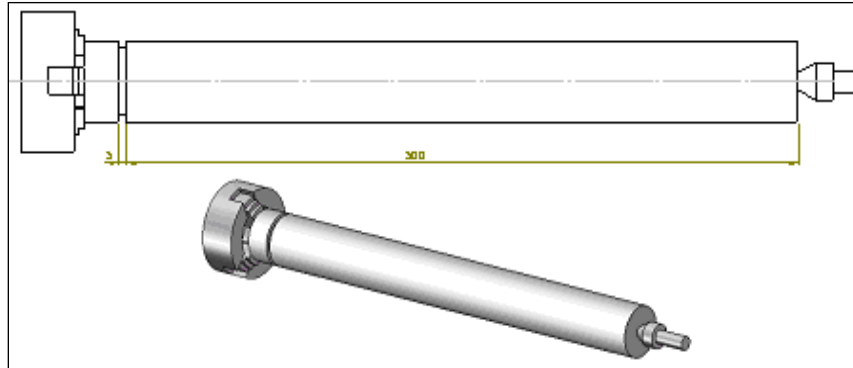


Figure II.8 :Eprouvette pour les essais d'usure.

3. Procédure expérimental :

3.1. Planification des experiences:

De nombreux facteurs influencent le comportement du couple 'Outil-Pièce'. Parmi les plus déterminants, on retrouve les paramètres du régime de coupe (vitesse V , avance f , profondeur de passe a_p), la géométrie de la zone active de l'outil (rayon de bec r , angles α , β , γ , ε , etc.), ainsi que les conditions de travail telles que la rigidité de la machine et la lubrification. L'ensemble de ces éléments constitue les paramètres d'entrée du couple 'Outil-Pièce'. En sortie, on observe des grandeurs telles que la tenue de l'outil, les efforts de coupe, la rugosité de surface, la température générée, ainsi que la morphologie des copeaux.

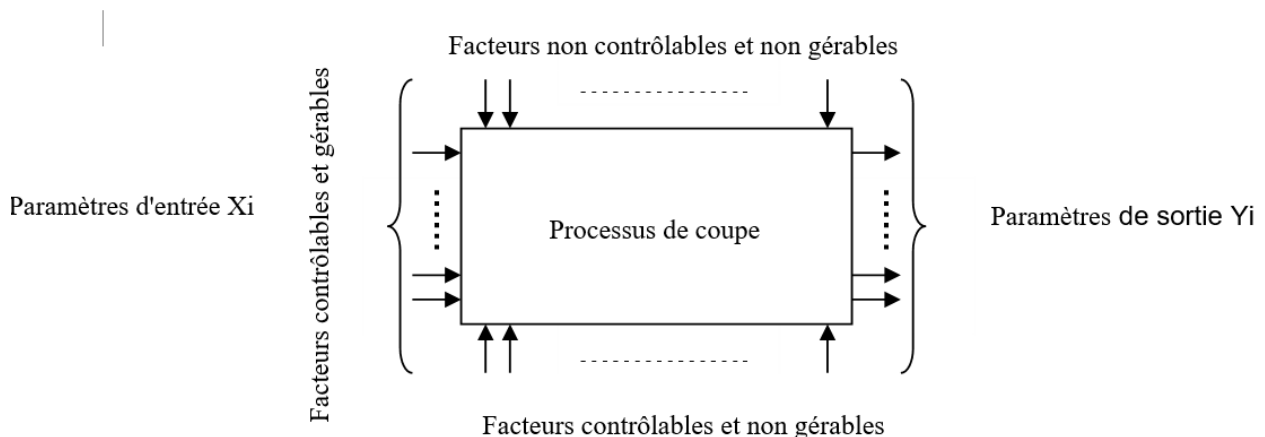


Figure II.9 : schéma structural du processus de coupe

Dans notre étude nous avons traité les points suivants:

- Evolution de l'usure de deux matériaux de coupe (GC4015 et P35).
- Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille VB.

Notons $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ comme paramètres d'entrée et $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ comme paramètres de sortie.

Les méthodes expérimentales utilisées pour étudier l'action d'un facteurs ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) sur un paramètre W sont: la méthode unifactorielle pour la détermination de l'influence de la vitesse de coupe sur la durée de vie des outils, la rugosité et l'usure. [6, 18, 16, 19].

3.2. Méthode unifactorielle.

Les expériences réalisées selon cette méthode donnent des résultats qui seront exprimé par la relation du type $Y=f(X)$, ayant la forme:

$$Y=C.X^b \quad (I.1)$$

Où :

C: Constante qui tient copte de conditions de travail.

b: Exposant qui indique le degré d'influence de X sur Y .

Pour réaliser une expérience selon cette méthode on donne une série se valeurs discrètes au facteur examiné $X, X_i \in [X_{min} \text{ } X_{max}]$, tout en maintenant les autres facteurs constants.

Les valeurs des facteurs principaux maintenus constants et les conditions de travail sont portées sur le tableau 6 qui contient les valeurs de (X et Y). Pour chaque $X=X_i$, on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de $Y_i (i \in \{1 \text{ } N\})$. Les résultats de ces essais sont portés sur le tableau 6.

La répétition des essais dons les mêmes conditions augmente la précision de ces derniers .Ces essais sont appelés parallèles. Par exemple, en répétant un essai cinq fois ($n=5$) la probabilité de confiance dans ce cas peut être estimée à $\gamma =0.90$. En technologie de construction mécanique, la valeur recommandée et la plus utilisée est $\gamma =0.95$.

Cette probabilité de confiance ne peut être obtenu que si le nombre d'observations (n) soit égal à 7. Mais parfois, pour des raisons techniques ou économique, la réalisation des expériences devient difficile, dans ces conditions on peut se contenter d'un nombre d'essai parallèle $n=3$.

Tableau 6 : Succession de réalisation des essais d'après la méthode unifactorielle.

Ion								
N°=	Paramètres d'entrée X	Facteurs de sortie						Y moyen
		Yi1	Yi2	..... ..	Yig	..... ...	Yin	
1	X1	Y11	Y21	.....	Y1g	.....	Y1n	Ymoy 1
2	X2	Y21	Y22	.....	Y1g	.....	Y2n	Ymoy 2
i	Xi	Yi2	Yi2	.....	Yig	.....	Yin	Ymoy i
N	XN	YN1	YN 2	.....	YNg	.....	YNn	YmoyN

Habituellement on recommande N= (5 ÷15).Ce nombre d’essais est choisi en fonction du mode de la recherche et des conditions de travail. Le nombre global des essais sera égal à N. [18].

3.3. Méthodes expérimentales :

Pour déterminer les constantes du modèle mathématique ayant la forme suivante:

$$Y=C.X^b \tag{II.1}$$

nous avons utilisé un programme en matlab (annexe I) qui donne directement les valeurs des constantes du modèle ainsi que le coefficient de corrélation R². Par conséquent selon ce programme on peut déterminer les constantes d₀ et d₁ du modèle mathématique suivant:

$$T = e^{d_0} \cdot V^{d_1} . \tag{II.2}$$

4. Mode opératoire de réalisation et Conditions de coupe :

4.1. Mode opératoire de realisation:

Nous avons tout d’abord préparé les éprouvettes (figure 10), puis réalisé des usinages de type chariotage.

Usure et rugosité:

Le contrôle de l'usure des zones de contact, en particulier des arêtes de coupe, est réalisé après chaque passe d'essai à l'aide d'un microscope optique offrant une précision de 5 µm. Ce contrôle permet de mesurer et de suivre différents types d'usure : l'usure en dépouille principale (VB), l'usure en dépouille secondaire (VS) ainsi que la profondeur entre l'arête initiale et la zone usée (VC). La limite d'usure admissible retenue pour VB est fixée à 0,3 mm. Par ailleurs, la mesure de la rugosité est effectuée directement sur la même machine, sans démontage de la pièce, à l'aide d'un rugosimètre portable de marque Mitutoyo, et ce, après le contrôle de l'usure.

4.2. Condition de coupe :

La pièce est maintenue en montage mixte. L'usinage a été effectué à sec (sans lubrification) et dans les conditions de coupe suivantes (tableau 6):

Tableau 7 :condition de coupe

Conditions de coupe	Vitesse de coupe (m/min)	Avance (mm/tr)	Profondeur de passe (mm)
Unifactorielle	120-150-180-250	0.08	0.25

Chapitre III : Résultats expérimentaux , Analyse et interprétation

Partie 1 : Résultats expérimentaux

1. Introduction :

Ce segment se focalise sur l'exposition des résultats liés à l'effet des conditions de coupe sur les paramètres de sortie, y compris l'usure d'outil et la rugosité de la surface. Ces paramètres ont un impact direct sur le comportement du couple « Outil-Pièce » lors de l'usinage de l'acier C30, en utilisant deux types plaquettes carbure : une plaquette revêtu (GC4015) et une autre non revêtu (P35).

2. Résultats des essais de l'usure:

L'évolution de l'usure au fonction du temps lors de l'usinage de l'acier C30 a été observée en se servant de deux types d'outils de coupe : le carbure revêtu (GC4015) et le carbure non revêtu (P35). Des essais ont été effectués sur des tubes d'expérimentation (figure II.8), en adoptant une méthode unifactorielle.

2.1. Influence de la vitesse de coupe sur l'usure :

Les résultats de l'évolution de l'usure en fonction du temps d'après la méthode unifactorielle sont représentés sur les figures III.1 à III.5.

Les éléments de l'usure (VB, VC et VS) sont montrés sur la figure I.18.

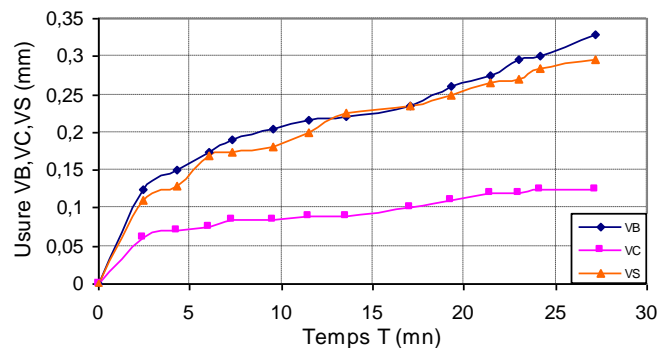


Figure III.1.a $V_c=120$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

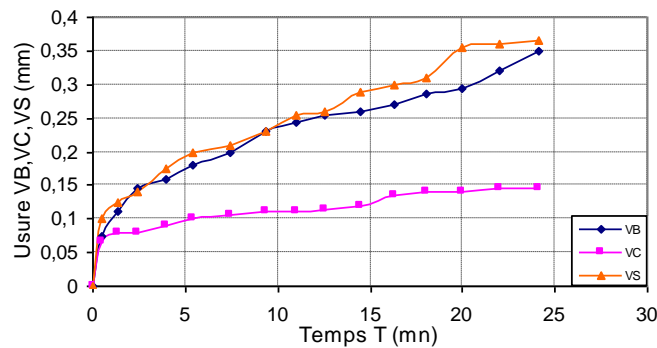


Figure III.1.b $V_c=150$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

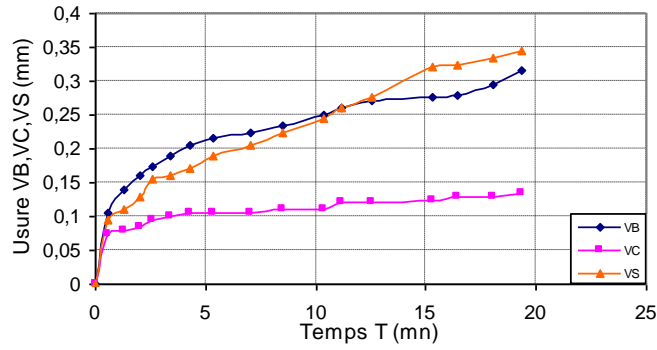


Figure III.1.c $V_c=180$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

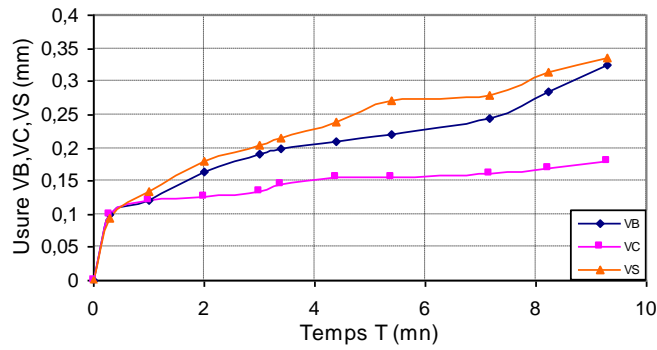


Figure III.1.d $V_c=250$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

Figure III.1 : Evolution de l'usure (VB, VC, VS) de l'outil P35 en fonction du temps lors de l'usinage de l'acier C30 pour différentes vitesses de coupe.

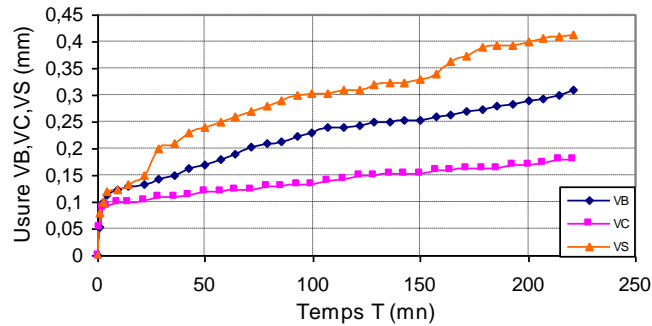


Figure III.2.a $V_c=120$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

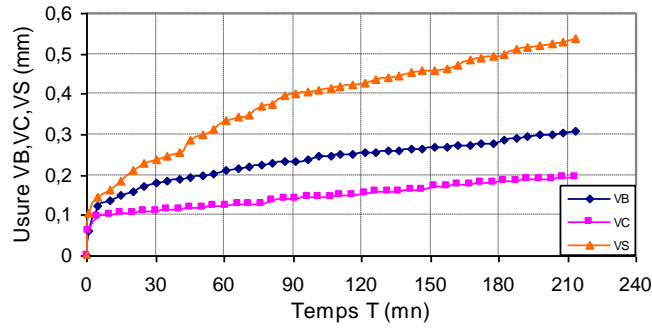


Figure III.2.b $V_c=150$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

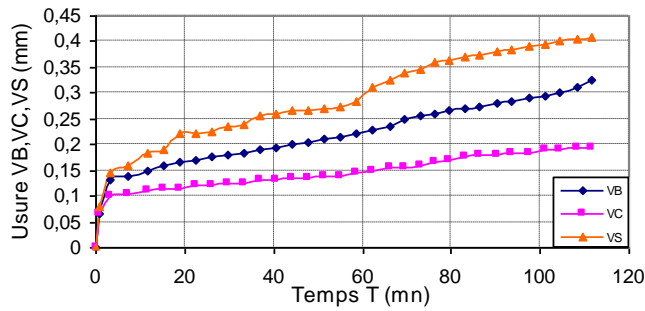


Figure III.2.c $V_c=180$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

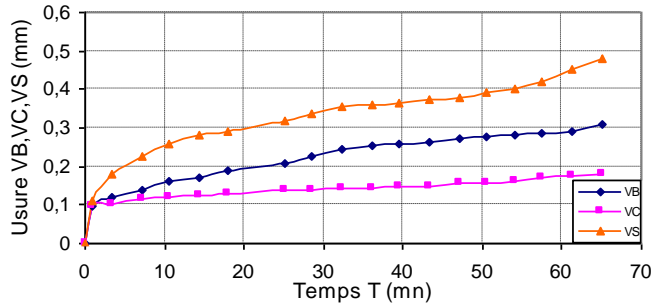


Figure III.2.d $V_c=250$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

Figure III.2 : Evolution de l'usure (VB, VC, VS) de l'outil GC4015 en fonction du temps lors de l'usinage de l'acier C30 pour différentes vitesses de coupe.

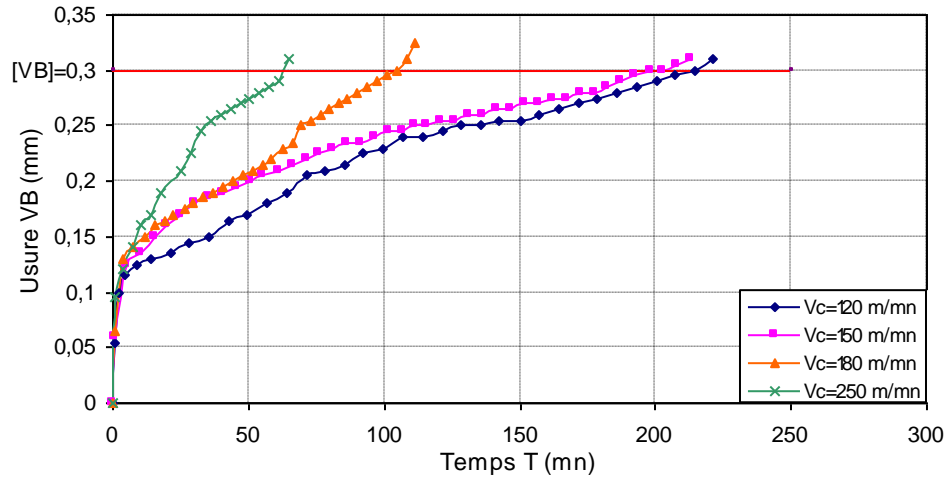


Figure III.3 :Evolution de l'usure en dépouille (VB) du GC4015 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier C30

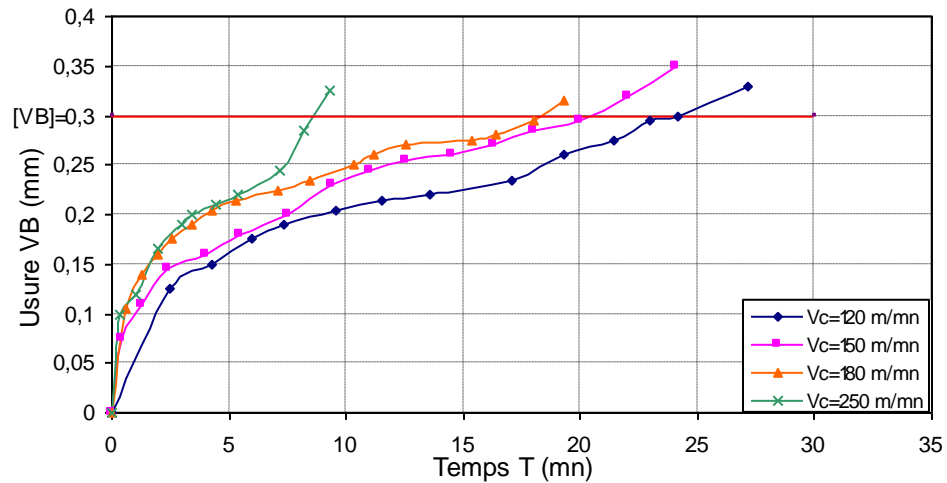


Figure III.4 :Evolution de l'usure en dépouille (VB) du P35 en fonction du temps et de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier C30

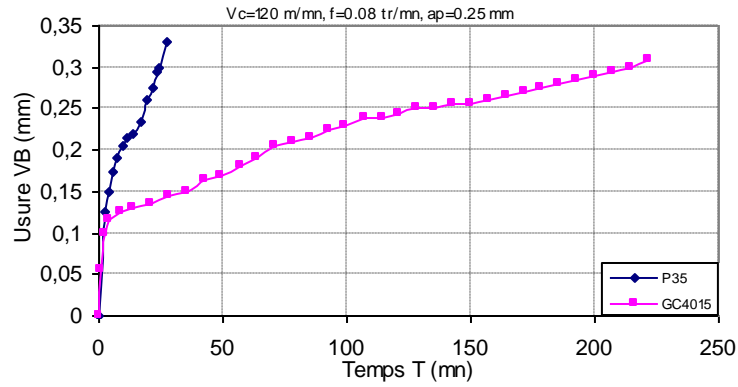


Figure III.5.a $V_c=120$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

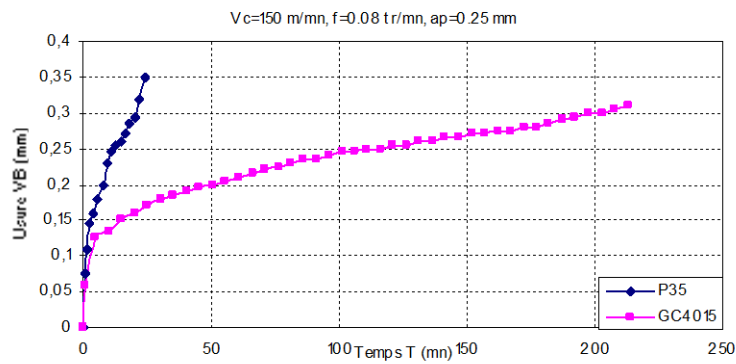


Figure III.5.b $V_c=150$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

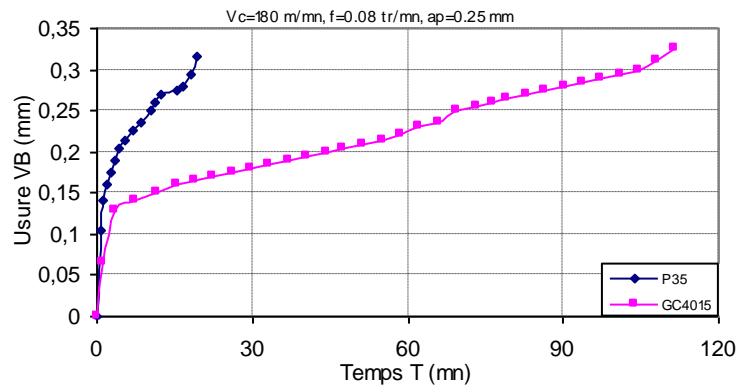


Figure III.5.c $V_c=180$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

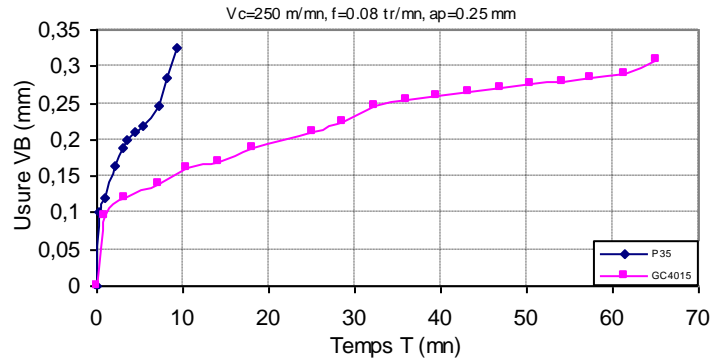


Figure III. 5.d $V_c=250$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

Figure III.5 :Evolution de l'usure en dépouille (VB) en fonction du temps et du matériau de coupe lors de l'usinage de l'acier C30 pour différentes vitesses de coupe.

3. Résultats des essais de la rugosité des surfaces usinées :

Cette partie expose les conclusions concernant l'impact des paramètres de coupe sur la rugosité des surfaces produites lors de l'usinage de l'acier C30 en utilisant des outils en carbure non revêtus (P35) et revêtus (GC4015). L'analyse de l'impact de l'usure en dépouille sur la rugosité sera également effectuée. En complément, des modèles mathématiques seront suggérés pour représenter la rugosité en lien avec les paramètres du régime de coupe.

3.1. Influence de l'usure sur la rugosité des surfaces usinées :

Le premier suivi de l'évolution de la rugosité a été réalisé simultanément avec celui de l'usure, en utilisant l'ébauche représentée à (la figure II.8). Les effets de l'usure sur la rugosité, selon les approches unifactorielle.

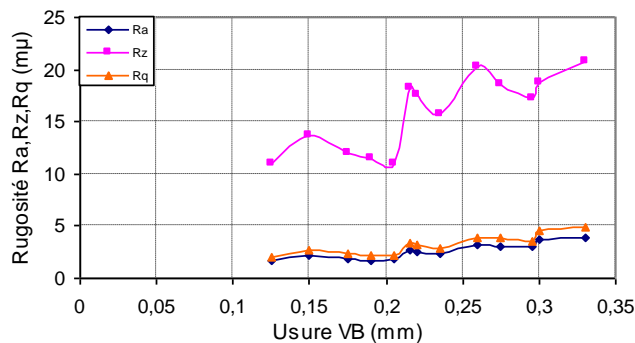


Figure III.6.a $V_c=120$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

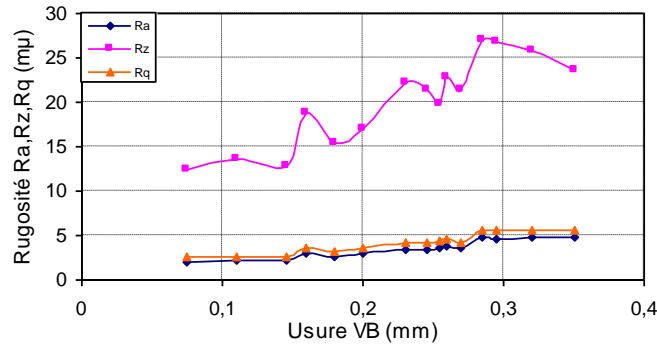


Figure III.6.b $V_c=150$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

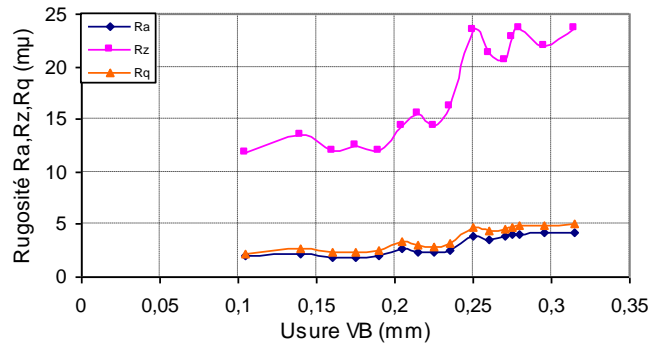


Figure III.6.c $V_c=180$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

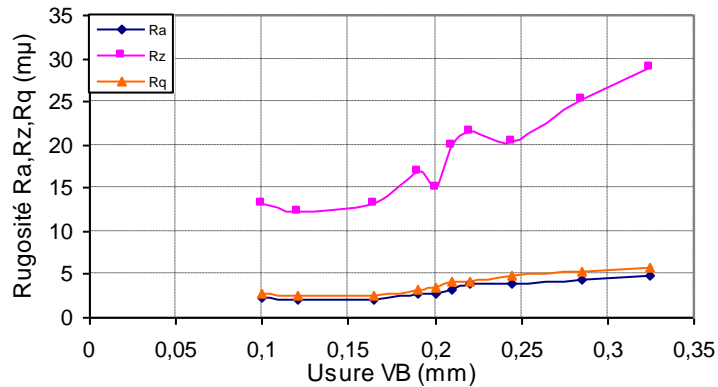


Figure III.6.d $V_c=250$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm.

Figure III.6 : Evolution de la rugosité (Ra, Rz, Rq) de l'outil P35 en fonction de l'usure VB lors de l'usinage de l'acier C30 pour différentes vitesses de coupe.

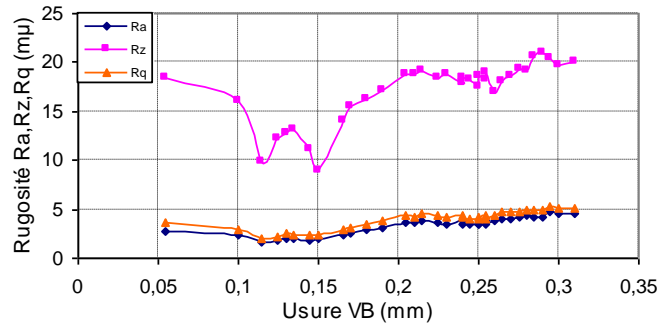


Figure III.7.a $V_c=120$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

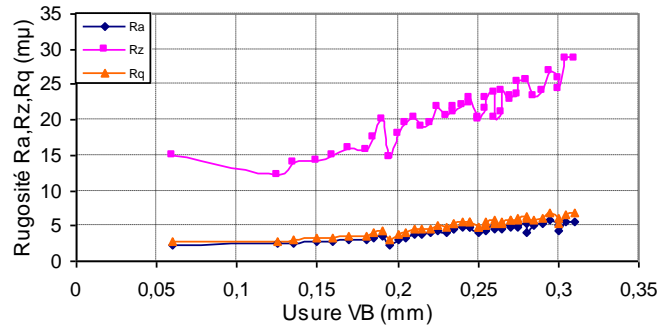


Figure III.7.b $V_c=150$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

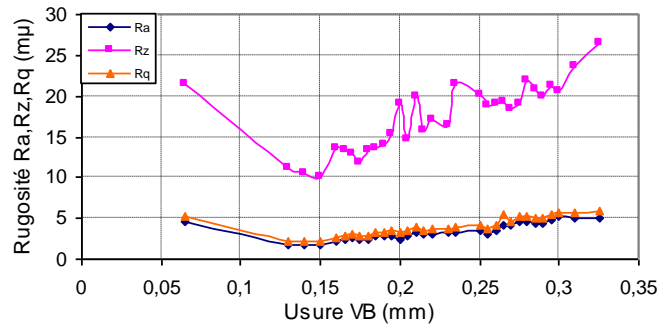


Figure III.7.c $V_c=180$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

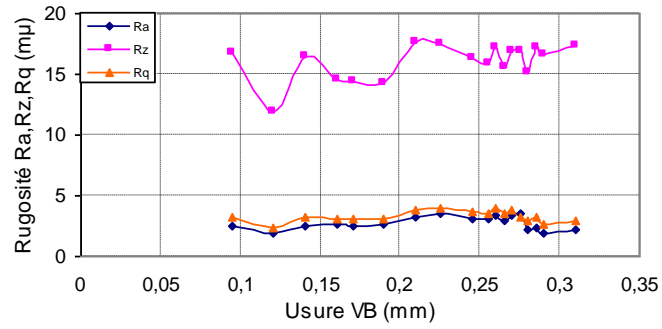


Figure III.7.d $V_c=250$ m/mn, $f=0.08$ tr/mn, $a_p=0.25$ mm

Figure III.7 :Evolution de la rugosité (Ra, Rz, Rq) de l'outil GC4015 en fonction de l'usure VB lors de l'usinage de l'acier C30 pour différentes vitesses de coupe.

Partie 2 : Analyse et interprétation :

1. Introduction :

Ce chapitre se consacre à l'examen et à l'explication des résultats présentés au chapitre III. Il se concentre précisément sur l'analyse du contact « outil-pièce » lors de l'usinage de l'acier C30, en employant deux types de plaquettes de coupe : GC4015 et P35. Cette étude a été effectuée sur la base de conceptions expérimentales, en observant l'effet des facteurs d'entrée tels que la vitesse de coupe (V_c), l'avance par rotation (f) et la profondeur de coupe (a_p) sur les résultats, y compris l'usure de l'outil et la rugosité de la surface.

2. Analyses des résultats de l'usure lors de l'usinage de l'acier C30 avec les outils P35 et GC4015 :

L'outil subit une détérioration graduelle qui se produit durant le processus de coupe. Lorsqu'elle est excessive, cela nuit à la qualité de l'usinage et peut finalement provoquer une défaillance complète de l'outil. Cela met en évidence la nécessité vitale d'établir un système de suivi en temps réel pendant le processus d'usinage. En général, l'usure de l'outil découle essentiellement des frictions provoquées entre l'outil de coupe et la pièce en cours d'usinage.

2.1. Analyse de l'influence de la vitesse de coupe sur l'usure :

Les figures III.1 et III.2 illustrent graphiquement l'évolution des divers types d'usure des plaquettes, tels que l'usure principale (VB), l'usure auxiliaire (VS) et l'usure du coin (VC), en lien avec le temps et différentes vitesses de coupe. L'étude de ces graphes démontre que le phénomène d'usure se conforme à la loi universelle de l'usure, qui se caractérise traditionnellement par trois phases principales suivante

Zone 1: Cette période correspond aux premières secondes d'opération et se caractérise par une usure intensive, souvent désignée comme l'usure initiale, de rodage ou de jeunesse. Cette grande vitesse d'accroissement de l'usure des outils peut être attribuée à la suppression des irrégularités présentes sur l'arrête tranchant laissées suite au processus d'affûtage ou de fabrication.[13]

Zone 2: Dépassant la phase de rodage, l'usure progresse à une vitesse généralement plus lente et tend à devenir approximativement linéaire. Dans la littérature, cette zone est désignée par l'expression « usure normale » ou encore de maturation. Elle se caractérise par une forte résistance à l'usure. Au fur et à mesure que l'outil travaille, la température entre l'outil et la pièce ainsi qu'entre l'outil et le copeau augmente, ce qui favorise l'émergence de la troisième zone.[13]

Zone 3: Démontre la phase de dégradation accélérée (catastrophique) ou de vieillissement. Dans cette région, l'instrument perd ses propriétés de découpe. L'examen des courbes indique que pour le matériau GC4015, l'usure en dépouille auxiliaire (VS) s'accroît de façon notable et plus rapide que l'usure en dépouille principale (VB). En ce qui concerne le matériau P35, on note une tendance comparable aux vitesses de coupe de 150, 180 et 250 m/min, où l'usure (VS) augmente plus rapidement que l'usure (VB). Cependant, à une vitesse de 120 m/min, l'érosion par dépouille principale (VB) devient dominante, dépassant celle de la dépouille auxiliaire. Concernant l'usure du biseau, la vitesse d'usure est toujours inférieure à celle de l'usure sur la coupe principale pour

les deux types de matériaux examinés. Cette représentation graphique facilite la comparaison des tendances de progression des divers types d'usure (VB, VS et VC) en relation avec le temps et selon différentes vitesses de coupe. Les figures III.3 et III.4 présentent l'évolution de l'usure en dépouille pour les matériaux GC4015 et P35, selon plusieurs vitesses de coupe. L'examen de ces courbes souligne l'impact notable de la vitesse de coupe sur le profil d'usure. Il est vrai qu'une hausse de la vitesse de coupe provoque une usure plus rapide, ce qui peut diminuer considérablement la durée de la période d'usure dite « normale ».

Les figures illustrent de façon claire que ce phénomène est particulièrement prononcé à une vitesse de 250 m/min. Par contre, si on utilise une vitesse de coupe plus basse, comme 120 m/min, la zone liée à l'usure normale a tendance à s'étendre. Par ailleurs, la limite d'usure admissible (VB) est représentée par une ligne horizontale sur les graphes.

Par l'analyse graphique des résultats obtenus, on peut aussi observer et comparer la progression de l'usure en dépouille principale (VB) selon le temps pour divers matériaux de coupe et différentes vitesses de coupe. Cette progression est illustrée par la Figure III.5 pour les matériaux GC4015 et P35. Il apparaît que l'usure VB s'accroît de façon plus rapide et plus marquée pour le matériau P35, par rapport au GC4015. Cette progression accélérée de l'usure chez le P35 limite significativement la durée de la phase d'usure normale. Ainsi, il peut être conclu que le matériau GC4015 présente une meilleure résistance à l'usure que le P35.

Tenue des outils :

L'illustration graphique des résultats concernant l'usure en dépouille principale (VB) sur une période, pour les diverses vitesses de coupe envisagées, a permis d'évaluer la résistance des deux matériaux de coupe examinés. Pour cette étude, le critère d'usure choisi est celui préconisé par la norme ISO, qui fixe une usure en dépouille tolérable à $[VB] = 0,3 \text{ mm}$.

Tableau 8 : Durées de vie des différents matériaux à outil testés en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier C30

N° Essai	Paramètres d'entrée Régime de coupe		Durées de vie T (mn) à VB = [0.3] mm		
	Vc (m/mn)	f (mm/tr)	ap (mm)	P35	GC4015
1	120	0.08	0.25	24.17	214.32
2	150	0.08	0.25	20.3	198
3	180	0.08	0.25	18.3	104.45
4	250	0.08	0.25	8.36	63

L'analyse des résultats met en évidence une forte sensibilité de la durabilité des outils aux variations de la vitesse de coupe. On peut aussi examiner cette sensibilité en scrutant les rapports de progression des vitesses de coupe successives et leur impact sur la durée de vie associée des outils (tableau 9).

Tableau 9 : Effets des différentes plages de vitesses de coupe sur la durée de vie des plaquettes : GC4015 et P35 pour $[VB] = 0.3 \text{ mm}$.

Rapport d'augmentation successive des vitesses de coupe		Rapport des tenues			Plage de variation de la vitesse de coupe (m/min)
		Ts/Ti	P35	GC4015	
V_2/V_1	1.25	T_2/T_1	0.83	0.92	$V_c = [120 - 150]$
V_3/V_2	1.2	T_3/T_2	0.9	0.52	$V_c = [150 - 180]$
V_4/V_3	1.38	T_4/T_3	0.45	0.6	$V_c = [180 - 250]$

La figure III.1 démontre la durée de vie des outils lors du travail de l'acier C30 en employant les deux matériaux de coupe, GC4015 et P35, à différentes vitesses de coupe. L'analyse des résultats révèle que, pour des vitesses allant de 120 à 150 m/min et avec un rapport de vitesse établi à 1,25, la durabilité des outils diminue de 8 % pour le GC4015 et de 17 % pour le P35. Par ailleurs, à des vitesses plus élevées, entre 150 et 180 m/min, avec un coefficient de variation de 1,2, on observe une diminution plus marquée de la durée de vie, atteignant 48 % pour le GC4015 et 10 % pour le P35.

Pour des vitesses de coupe encore plus rapides, variant entre 180 et 250 m/min et avec un ratio de vitesses de 1,38, la durée de vie des outils se réduit considérablement. Effectivement, on constate une diminution de 40 % concernant le matériau GC4015 et de 55 % pour le P35. Cette étude révèle que l'impact de la vitesse de coupe sur la durée de vie est plus prononcé pour les plages de vitesses élevées.

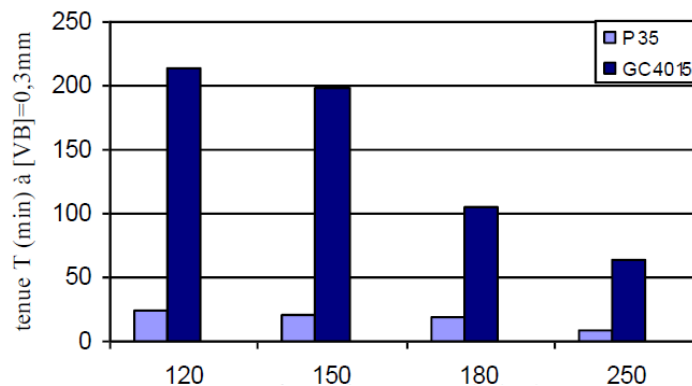


Figure III.8 : Tenues expérimentales des différents matériaux à outil à différentes vitesses de coupe, à $[VB]=0.3 \text{ mm}$ lors de l'usinage de l'acier C30.

2.2. Modèle mathématique de la tenue en fonction de la vitesse de coupe :

L'analyse des résultats d'usure provenant des figures III.3 et III.4 a conduit à la création de modèles de durabilité basés sur la vitesse de coupe pour $[VB]=0,3$ mm.

Tableau 10 : Modèles de la tenue en fonction de la vitesse de coupe.

Matériaux de coupe	Paramètres Variable	Méthode unifactoriel	
		Modèles mathématiques	Coefficient de corrélation
P35	Vc	$T = e^{38.82} Vc^{-0.12}$	R = 0.94
GC4015		$T = e^{361.16} Vc^{-1.21}$	R = 0.96

Le tableau 10 présente les modèles mathématiques démontrant la relation entre la durée de vie des outils et la vitesse de coupe pour les matériaux GC4015 et P35. Ces modèles permettent, dans le cadre de conditions de coupe stabilisées, de déterminer la vitesse de coupe appropriée en fonction de la durée de vie souhaitée. Ils mettent clairement l'accent sur l'importance vitale de la vitesse de coupe pour la durabilité des matériaux : une augmentation de cette vitesse entraîne une réduction notable de la durée de vie des outils. Ainsi, ces modèles constituent des instruments indispensables pour la conception d'abaques technologiques et l'optimisation du processus d'usinage.

3. Analyses des résultats de la rugosité :

3.1. Analyse de l'influence de l'usure sur la rugosité des surfaces usinées :

L'usure est un facteur qui influe sur la rugosité de la surface usinée au niveau du contact "Outil-Pièce". Cette étude est dédiée au suivi de l'évolution de la rugosité de l'acier C30 en fonction de l'usure en dépouille des outils P35 et GC4015. L'objectif de cette quantification est de mettre en relation la rugosité de la surface comme critère de qualité de production avec l'usure de l'outil de coupe en tant que moyen de contrôle de la production. [14]

L'analyse du comportement de la rugosité de surface de l'acier C30 en fonction de l'usure en dépouille des outils, réalisée à l'aide des approches unifactorielle, est représentée graphiquement dans (les figures III.6 à III.7). Il ressort de cette analyse qu'avec la progression de l'usure, la qualité de la surface usinée se dégrade. Cette dégradation s'explique notamment par l'augmentation progressive de l'usure au niveau des surfaces d'attaque et de dépouille de l'outil. Après un certain temps de fonctionnement, la formation du cratère, combinée à l'élargissement des bandes d'usure en dépouille, entraîne une altération de l'arête tranchante ainsi que du bec de l'outil, affectant ainsi la finition de la pièce. Par conséquent cette nouvelle morphologie de la partie active de l'outil sera reproduite sur la surface usinée de la pièce. Cette nouvelle morphologie de l'outil contribue à l'élévation de l'effort et de la température dans la zone de contact "Outil-Pièce" ce qui fait naître des vibrations dans le système usinant. Ces dernières se traduisent sur la surface générée de la pièce par des ondulations et des aspérités accentuées. Ceci a été constaté également dans la référence. [14]

L'analyse des graphiques montre également un profil en perpétuelle variation. Cette irrégularité pourrait être attribuée aux modifications géométriques que subit le fil de l'instrument, lesquelles découlent des conditions de coupe strictes et des températures extrêmes focalisées à la pointe de l'instrument. Ces facteurs contribuent à la dégradation progressive de l'arête, provoquant un changement dans le modèle d'usure observé.

Conclusion général :

L'analyse et l'interprétation des résultats obtenus lors de l'usinage de l'acier C30 avec deux plaquettes de coupe étudiée à différentes vitesses ont mis en évidence les conclusions principales suivantes :

- ❖ Les résultats des tests d'usure ont montré que chaque matériau de coupe a un comportement distinct face à l'usure. On a pu observer le meilleur comportement lors de l'usinage avec le carbure revêtu GC4015. Qui a montré une plus grande résistance à l'usure que l'outil en P35.
- ❖ Les courbes de suivi de l'usure en fonction du temps indiquent que la tendance de l'usure suit une loi universelle pour les pièces mécaniques. Présenté par une phase d'usure rapide, suivie d'une usure stable, puis d'une usure accélérée.
- ❖ Cette performance s'applique à toutes les vitesses de coupe étudiées. La structure et la composition chimique de l'outil (GC4015) expliquent sa moindre résistance par rapport à l'outil (P35), ce qui témoigne d'une interaction plus efficace au niveau de l'interface « Outil-Pièce ».
- ❖ Il est observé que la qualité de la surface usinée s'améliore à mesure que la vitesse de coupe augmente. La progression est principalement due à la diminution des efforts de coupe à haute vitesse, ce qui témoigne d'une stabilité accrue du système d'usinage.
- ❖ Au fur et à mesure que l'usure se développe, la qualité de la surface usinée diminue progressivement. Cette détérioration est due, d'une part, à l'augmentation progressive de l'usure sur les faces de coupe et de dépouille de l'outil, ce qui a entraîné une déformation de sa géométrie. La morphologie modifiée de la zone active de l'outil influe directement sur la surface créée par la pièce. D'un autre côté, cette usure augmente les efforts de coupe et augmente la température dans la zone de contact entre l'outil et la pièce, ce qui favorise l'apparition de vibrations au sein du système d'usinage. Les vibrations provoquent également la formation d'ondulations et d'aspérités marquées sur la surface usinée.
- ❖ Une augmentation de la vitesse de coupe provoque une élévation significative de la température dans la zone de formation du copeau. La plasticité du matériau usiné est accrue par cette élévation thermique, ce qui diminue, d'une part, les efforts requis pour sa déformation. D'un autre côté, elle améliore les conditions de frottement aux interfaces 'outil-pièce' et 'outil-copeau', ce qui contribue à une amélioration de l'efficacité du processus d'usinage.
- ❖ L'outil en carbure revêtu (GC4015) a exprimé une meilleure tenue à l'usure par rapport au carbure non revêtu (P35).

Référence

- [1] : **Lakhdar BOUZID** Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage-Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13- thèse de doctorat, Université de Guelma 2015
- [2] : Revue de la société royale belge des ingénieurs et des industries
- [3] : Usinabilité et lois générales de l'usinage des aciers et des fontes, mécanique, matériaux, électricité
- [4] : Etude comparée de deux tests rapides d'usinabilité, corrélation avec les résultats d'essais de longue durée. Revue de met
- [5] : <http://robert.cireddu.free.fr/Ressources/Prod/Couple%20outil-piece/>
- [6]: **Yallese M.A.**, Etude de comportement a l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur, Thèse de doctorat, Université de Annaba 2005
- [7] : **Carro Cao. G et Santichi M.**, La formation du copeau et de la surface usinée, INSA Lyon
- [8] : **Pantale O**, Développement d'un modèle numérique de la coupe des métaux, thèse de doctorat, 1998
- [9] : <https://fabrication1.blogspot.com/2013/09/les-differents-types-de-copeaux.html>
- [10] : extraite du rapport de Leroy
- [10] : **Bouziane A.** Etude de l'effet des conditions d'usinage sur le couple "Outil-Pièce" en tournage, Mémoire de magister, Université Annaba, 2009.
- [11] : <httpswww.secotools.comarticle120669language=fr>
- [12] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Vibrations_d%27usinage
- [13] : **These de doctorat Yallese et mémoire de magister Benchihab**
- [14] : **Yallese M, Boulanouar L, Chaoui K**, Usinage de l'acier 100Cr6 trempé par un outil en nitrure de bore cubique, Revue Mécanique & Industries, Volume 5, N°4, 2004, pp 355-368.
- [15]: **Remadna M**, Le comportement du système usinant en tournage dur, application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN, Thèse de doctorat, INSA-LYON 2001.
- [16]: **Benchiheub S**, Etude de l'usure et de la rugosité lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 avec les plaquettes CBN et Céramiques, Mémoire de magister, Université Annaba, 2005.
- [17]: **Ledoux Y**, Modélisation et étude expérimentale du comportement géométrique de l'ensemble: « Machine ~ Outil ~ Matière » appliqué à un tour, Mémoire de diplôme d'étude approfondies « Mécanique», université de savole, 2002.

[18]:**Talhi F**, Etude de l'influence du système MoDOP sur le comportement a l'usure des outils de coupe. Mémoire de magister, Université de Annaba, 2003.

[19]:**Mahfoudi F**, Etude de l'influence de la machine-outil sur les paramètres technologiques, Mémoire de magister, Université de Annaba, 1997.