

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



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat LMD

Spécialité : GENIE DES MATERIAUX

Par

ABDELJOUAD Amira

THÈME

**Contribution à l'Etude des Performances de Coupe
et des Mécanismes d'Usure des Outils en Carbure
avec Revêtements Composites**

Soutenue publiquement le .. / .. / 2024 devant le jury :

BOUAKBA Mustapha		Université de Ouargla	Président
REZGUI Imane	M.C.A	Université de Ouargla	Rapporteur
BELLOUFI Abderrahim	Professeur	Université de Ouargla	Co-Rapporteur
ABDELKRIM Mourad		Université de Ouargla	Examineur
GUEBAILIA Moussa		Université de Ouargla	Examineur
BOUREBBOU Amor		Université de Constantine 1	Examineur

DEDICACE

Je dédie ce travail

À mes parents

À ma chère fille Israa

À mon époux et à sa famille, qui constituent ma deuxième famille

À mes sœurs, mon frère et mes nièces

*À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à compléter cette thèse, je vous exprime ma
profonde gratitude.*

REMERCIEMENT

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Dieu, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la persévérance et la clarté d'esprit nécessaires tout au long de ce parcours doctoral.

Je souhaite tout particulièrement adresser mes remerciements à la Dr. REZGUI Iman, ma directrice de thèse. Votre rôle, après Dieu Tout-Puissant, dans l'éclaircissement de la voie de la recherche par vos conseils et orientations est inestimable. Que Dieu récompense vos efforts.

Je voudrais également exprimer ma reconnaissance envers Professeur BELLOUFI Abderrahim, dont les contributions ont enrichi mon expérience de recherche. Votre expertise complémentaire et votre soutien ont grandement enrichi la qualité et la portée de ma thèse.

J'aimerais également exprimer ma gratitude envers Faculté des sciences Appliquées Kasdi Merbah Ouargla pour avoir créé un environnement propice à la recherche et à l'apprentissage, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers ma famille pour leur amour, leur soutien inconditionnel et leur compréhension tout au long de ce parcours académique exigeant.

TABLE DES MATIERES

Introduction Générale.....	3
Chapitre I Etude bibliographique	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Coupe des métaux.....	4
I.2.1 Paramètres de coupe.....	6
I.3 Outil de coupe.....	8
I.3.1 Géométrie de l'outil de coupe.....	8
I.4 Matériaux des outils de coupe.....	10
I.4.1 Propriétés des matériaux des outils de coupe.....	10
I.4.2 Types de matériaux d'outils de coupe.....	11
I.5 Outils Revêtus.....	15
I.5.1 Dépôt CVD.....	16
I.5.2 Dépôt PVD.....	16
I.6 Température de coupe.....	18
I.6.1 Sources de génération de chaleur.....	18
I.6.2 Effets de la température de coupe élevée.....	20
I.7 Tribologie des outils de coupe.....	21
I.8 Endommagement des outils de coupe.....	22
I.8.1 Mécanismes d'usure.....	23
I.8.2 Formes d'usure.....	26
I.9 Facteurs influençant la température de coupe des outils revêtus.....	28
I.9.1 Épaisseur du revêtement.....	28
I.9.2 Propriétés physiques thermiques.....	29
I.9.3 Frottement à l'interface outil-cope.....	29

1.9.4 Répartition de la chaleur à l'interface outil-copeau.....	30
1.9.5 La résistance thermique de contact à l'interface outil-copeau.....	31
1.9.6 La couche de diffusion substrat-revêtement.....	31
1.10 Synthèse des travaux de mesure de la température de coupe des outils revêtus.....	32
1.11 Conclusion.....	33

Chapitre II

Procédure expérimentale

II.1 Introduction	35
II.2 Description du matériel utilisé	35
II.2.1 La pièce.....	35
II.2.2 L'outil de coupe.....	37
II.2.3 La machine.....	39
II.2.4 Dispositif de mesure de la température.....	40
II.2.5 Les thermocouples.....	41
II.3 Mesure de la température de coupe.....	42
II.4 Préparation des essais.....	43
II.4.1 Installation des thermocouples.....	43
II.4.2 Montage de la pièce.....	44
II.4.3 Montage de l'outil.....	45
II.5 Acquisition des données.....	47
II.6 Conclusion.....	48

Chapitre III

Analyse des Résultats Expérimentaux

III.1 Introduction	49
III.2 Analyse de la fiabilité du dispositif de mesure	49
III.3 Impact temporel sur la température de coupe ; Comparaison entre plaquettes revêtues et non revêtues.....	51
III.4 Influence de l'avance par tour et de la vitesse de rotation.....	57
III.5 Influence de la profondeur de passe et de la vitesse de rotation.....	60

III.6 Aspect physique des copeaux.....	62
III.7 Conclusion	67

Chapitre IV**Modélisation numérique de la température de coupe**

IV.1 Introduction	68
IV.2 Modèle de coupe orthogonale pour la simulation de l'usinage de l'acier X200Cr12.....	68
IV.3 Modèle géométrique.....	69
IV.3.1 Modélisation de la pièce.....	72
IV.3.2 Modélisation de l'outil de coupe.....	75
IV.4 Résultats et Discussions.....	77
IV.4.1 Distribution de température.....	77
IV.4.2 Effet de la vitesse de rotation et d'avance sur la température de coupe	78
IV.4.3 Analyse comparative des résultats entre simulations et expérimentations.....	81
IV.5 Conclusion	83
Conclusion Générale	84
Références Bibliographiques	85

LISTE DES FIGURES

Chapitre I		
Etude Bibliographique		
Figure I.1	Processus du tournage	5
Figure I.2	Paramètres de coupe	7
Figure I.3	Outils de coupe	8
Figure I.4	Géométrie de l'outil de coupe	9
Figure I.5	Types de matériaux d'outil de coupe	11
Figure I.6	Processus CVD.....	16
Figure I.7	Processus PVD.....	17
Figure I.8	Sources de génération de chaleur lors d'usinage	19
Figure I.9	Illustration visuelle du tribosystème de l'outil de coupe.....	22
Figure I.10	Usure abrasive	24
Figure I.11	Usure par adhésion	24
Figure I.12	Mécanismes d'usure	25
Figure I.13	Usure par oxydation	26
Figure I.14	Types d'usure	27
Figure I.15	a) Modèle de transfert de chaleur transitoire unidimensionnel d'un outil revêtu ; (b) Épaisseur du revêtement en TiN vs. distribution de température; (c) Modèle de transfert de chaleur transitoire unidimensionnel d'un outil revêtu monocouche ; (d) Épaisseur du revêtement en TiC vs. distribution de température	29
Chapitre II		
Procédure expérimentale		
Figure II.1	Forme des pièces utilisées lors des essais.....	36
Figure II.2	Outil de coupe utilisé	37
Figure II.3	Caractéristiques géométriques des plaquettes de coupe. (a) Plaquette CNMG120404-M34 revêtue. (b) Plaquette CNMG120404-SF non revêtue.....	38
Figure II.4	Système fixation de la plaquette	39
Figure II.5	Le tour utilisé.....	40
Figure II.6	Dispositif de mesure de la température.....	41
Figure II.7	Thermocouple de type K	42
Figure II.8	Disposition typique d'un thermocouple outil-pièce.....	42

Figure II.9	Installation des thermocouples.....	43
Figure II.10	Dispositif de fixation de la pièce.....	44
Figure II.11	Dispositif de fixation de l'outil de coupe	45
Figure II.12	Système de mesure de température utilisé dans ce travail ; (a) Tour parallèle, (b) Les thermocouples type K montent sur l'outil de coupe, (c) thermocouple type K, (d) Cobra3 CHEM-UNIT, (e) Ordinateur, (f) logiciel MEASURE, (g) Capture d'écran de la courbe de température donné.....	48

Chapitre III

Analyse des résultats expérimentaux

Figure III.1	Température en fonction du temps pour la catégorie 1, avec $f=0.045$ mm/tr, $a=0.1$ mm, et $N=440$ tr/min.....	52
Figure III.2	Température en fonction du temps pour la catégorie 1, avec $f=0.157$ mm/tr, $a=0.1$ mm, et $N=1500$ tr/min.....	53
Figure III.3	Température en fonction du temps pour la catégorie 1, avec $f=0.157$ mm/tr, $a=0.15$ mm, et $N=900$ tr/min.....	54
Figure III.4	Température en fonction du temps pour la catégorie 1, avec $f=0.225$ mm/tr, $a=0.25$ mm, et $N=900$ tr/min.....	55
Figure III.5	Variation de la température de coupe pour une vitesse de rotation de $N=440$ tr/min.....	56
Figure III.6	Variation de la température de coupe en fonction de l'avance par dent pour $a = 0.1$ mm.....	58
Figure III.7	Variation de la température de coupe en fonction de l'avance par dent pour $a = 0.15$ mm.....	58
Figure III.8	Variation de la température de coupe en fonction de l'avance par dent pour $a = 0.20$ mm.....	59
Figure III.9	Variation de la température de coupe en fonction de l'avance par dent pour $a = 0.25$ mm.....	59
Figure III.10	Variation de la température de coupe en fonction de la profondeur de passe pour $N = 440$ t/min.....	61
Figure III.11	Variation de la température de coupe en fonction de la profondeur de passe pour $N = 740$ t/min.....	61
Figure III.12	Variation de la température de coupe en fonction de la profondeur de passe pour $N = 900$ t/min	62

Chapitre IV

Modélisation numérique de la température de coupe

Figure IV.1	Illustration de la projection 3D-2D.....	70
Figure IV.2	Modèle EF pour la simulation 2D	71
Figure IV.3	Conditions aux limites	72

Figure IV.4	Courbe contrainte-déformation avec prise en compte de la dégradation due aux dommages.....	74
Figure IV.5	Géométrie 2D de l'outil de coupe.....	75
Figure IV.6	Illustration du Maillage.....	77
Figure IV.7	Répartition de la Température lors de l'Opération de Tournage.....	78
Figure IV.8	Température simulée en fonction du temps, avec $f=0.157$ mm/tr, $a=0.15$ mm, et $N=900$ tr/min.....	79
Figure IV.9	Température simulée en fonction du temps, avec $f=0.157$ mm/tr, $a=0.15$ mm, et $N=1500$ tr/min	80
Figure IV.10	Température simulée en fonction du temps, avec $f=0.045$ mm/tr, $a=0.15$ mm, et $N=440$ tr/min.....	80
Figure IV.11	Comparaison entre les températures mesurées et simulées, avec $f=0.045$ mm/tr, $a=0.1$ mm, et $N=440$ tr/min.....	82
Figure IV.12	Comparaison entre les températures mesurées et simulées, avec $f=0.157$ mm/tr, $a=0.1$ mm, et $N=1500$ tr/min.....	82
Figure IV.13	Comparaison entre les températures mesurées et simulées, avec $f=0.157$ mm/tr, $a=0.1$ mm, et $N=900$ tr/min.....	83

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II	
Procédure expérimentale	
Tableau II.1	Désignation de l'acier X200Cr12 selon différentes normes 36
Tableau II.2	Propriétés physiques pertinentes de l'acier X200Cr12..... 36
Tableau II.3	Composition chimique de l'acier X200Cr12..... 36
Tableau II.4	Caractéristiques fournies par le fabricant des plaquettes de coupe 39
Tableau II.5	Plan d'expérience 46
Chapitre III	
Analyse des résultats expérimentaux	
Tableau III.1	Résultat des tests de reproductibilité du système 50
Tableau III.2	Copaux obtenus avec la plaquette revêtue..... 63
Chapitre IV	
Modélisation numérique de la température de coupe	
Tableau IV.1	Paramètres thermomécaniques de l'acier X200Cr12..... 72
Tableau IV.2	Paramètres de la loi de comportement Johnson-Cook pour l'acier X200Cr12..... 74
Tableau IV.3	Caractéristiques thermomécaniques de l'outil de coupe 76

NOMENCLATURE

A	Limite d'élasticité
a_p	Profondeur de passe [mm]
B	Paramètre d'écrouissage.
C	Constante de vitesse de déformation
CVD	Dépôt chimique en phase vapeur
D	Diamètre
D_1, D_2, D_3, D_4, D_5	Constants des matériaux de la loi d'endommagement de Johnson et Cook .
f	Avance par tour, [mm/tr]
m	Coefficient de dépendance à la température.
N	vitesse de rotation
n	Coefficient d'écrouissage.
PVD	Dépôt physique en phase vapeur
VB	Usure en dépouille [mm]
V_c	Vitesse de coupe
V_f	Vitesse d'avance
α	Angle de dépouille principale [degré]
β	Angle de taillant [degré]
γ	Angle d'attaque [degré]
λ	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante [degré]

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le processus d'usinage, notamment le tournage, est essentiel dans la création de pièces mécaniques de haute précision. Avec les exigences croissantes en termes de qualité et de productivité, les chercheurs et ingénieurs explorent de nouvelles méthodes pour améliorer le processus de tournage.

Cette étude se concentre sur l'impact des variables de coupe sur la température de coupe lors de l'usinage du X200Cr12, un matériau largement utilisé dans divers secteurs industriels. Comprendre son comportement thermique est crucial pour optimiser les opérations d'usinage.

L'objectif principal est d'évaluer comment les paramètres de coupe, notamment l'utilisation de plaquettes revêtues ou non, influent sur la température de coupe du X200Cr12. Cela permettra de mieux contrôler les conditions de coupe, d'optimiser les performances et de prolonger la durée de vie des outils.

La température de coupe est un paramètre critique qui affecte la durabilité des outils, la qualité des surfaces usinées et la stabilité dimensionnelle des pièces. En comprenant son impact, cette étude vise à améliorer les processus d'usinage pour répondre aux défis actuels.

Cette recherche combine des approches expérimentales et numériques. Les expériences utilisent des thermocouples pour mesurer précisément la température de coupe, tandis que des simulations numériques modélisent les phénomènes thermiques.

Structurée en quatre chapitres, cette thèse commence par une revue exhaustive de la littérature sur le tournage, se focalisant sur l'usure des outils. Les chapitres suivants détaillent les procédures expérimentales, analysent les résultats et explorent la modélisation numérique de la température de coupe.

En combinant une approche expérimentale approfondie avec des techniques de modélisation avancées, cette étude vise à améliorer la compréhension des processus de coupe du X200Cr12 et à proposer des recommandations pratiques pour l'industrie.

Chapitre I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

Ce premier chapitre détaille l'étude bibliographique explorée dans cette thèse. Il commence par fournir une vue d'ensemble de l'usinage et des outils de coupe, soulignant leur importance cruciale dans l'industrie manufacturière et l'ingénierie. Une attention particulière est accordée aux principaux facteurs influençant les performances des outils de coupe, tels que le matériau travaillé, la vitesse de coupe, les angles de coupe, la chaleur générée lors du processus, les forces appliquées, et d'autres paramètres. La qualité et la productivité des processus de fabrication sont directement liées à l'efficacité et à la précision des outils de coupe.

Une section sera consacrée à l'étude de l'usure. Elle commencera par explorer les mécanismes d'usure, indispensables pour la conception de matériaux et de systèmes résistants à l'usure, contribuant ainsi à prolonger la durée de vie des composants mécaniques. Ensuite, les différentes formes d'usure seront examinées en détail. Enfin, les modèles mathématiques de prédiction de l'usure des outils de coupe, utilisés pour estimer la durée de vie des outils dans divers processus d'usinage, seront exposés.

La dernière partie de ce chapitre présentera un état de l'art de la recherche sur l'impact du revêtement des outils sur la température de coupe. Les facteurs habituels qui influencent la température de coupe avec des outils revêtus seront discutés.

I.2 Coupe des métaux

Les procédés de découpe des métaux constituent un ensemble d'opérations fondamentales dans le domaine de la fabrication industrielle, où les pièces métalliques sont façonnées en éliminant sélectivement le matériau indésirable. Cette discipline, au cœur de l'ingénierie mécanique, vise essentiellement à transformer la matière première en des produits finis répondant à des spécifications précises et exigeantes.

Outre les trois principales opérations de découpe que sont le tournage, le fraisage et le perçage, d'autres procédés spécialisés enrichissent l'arsenal des techniques d'usinage des métaux. Parmi ceux-ci, on peut citer le brochage, le meulage, l'électroérosion, le découpage au laser et bien d'autres, chacun offrant des avantages spécifiques selon les besoins de la production.

Le tournage, par exemple, se distingue par son aptitude à façonner des pièces cylindriques, coniques ou à formes complexes (figure I.1). Cet usinage s'effectue généralement sur un tour, où la pièce à usinée est fixée sur un mandrin et mise en rotation. La sélection minutieuse de l'outil de coupe, adapté au matériau et à la forme désirée, guide son

avancement progressif pour éliminer la matière et former des surfaces précises, qu'elles soient internes ou externes.

Les opérations de tournage englobent diverses étapes essentielles, telles que le chariotage pour obtenir des surfaces planes par un mouvement latéral de l'outil, le dressage pour créer des surfaces de révolution planes et concentriques, l'alésage pour des trous précis, le centrage pour l'alignement des pièces, et le perçage pour créer des trous traversants ou borgnes. Ces opérations sont cruciales dans divers secteurs, de l'automobile à l'aérospatiale, en passant par la fabrication de machines et d'équipements variés.

L'avancée continue des technologies d'usinage des métaux a donné naissance à des techniques de coupe toujours plus précises, rapides et polyvalentes, contribuant ainsi à l'amélioration constante de la qualité des produits manufacturés et à l'optimisation des processus de fabrication.

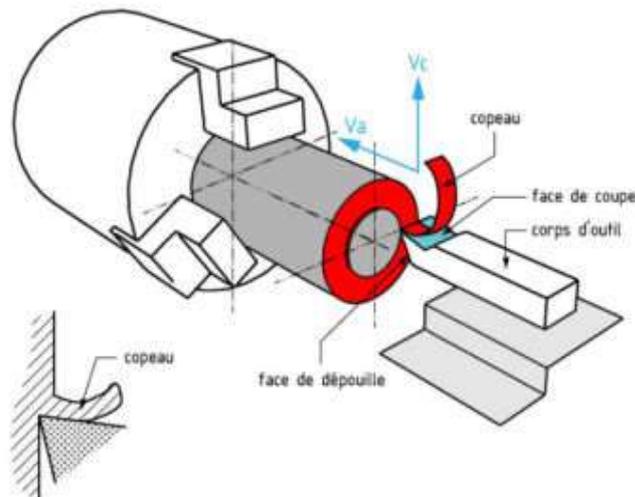


Figure I.1 Processus du tournage

Les opérations d'usinage se classent généralement en deux catégories, déterminées par leurs objectifs et leurs conditions de coupe : les coupes d'ébauche et les coupes de finition. Les coupes d'ébauche visent à éliminer rapidement de grandes quantités de matériau de la pièce initiale afin de créer une forme approximative de la pièce finale, tout en laissant une marge de matériau pour les opérations de finition ultérieures. D'autre part, les coupes de finition sont employées pour achever la pièce en atteignant les dimensions finales, les tolérances requises et la qualité de surface désirée.

Dans les opérations d'usinage en série, on procède généralement à une ou plusieurs coupes d'ébauche, suivies d'une ou deux passes de finition. Les coupes d'ébauche sont caractérisées par des avances et des profondeurs de coupe importantes, visant à maximiser l'enlèvement de matière tout en maintenant une productivité élevée. En revanche, les

opérations de finition nécessitent des avances et des profondeurs de coupe réduites pour garantir des dimensions précises et une qualité de surface optimale.

Les réglages des vitesses de coupe sont adaptés selon le type d'opération en cours. Lors de l'ébauche, les vitesses de coupe sont généralement réduites pour gérer efficacement les charges élevées résultant de l'enlèvement rapide de matériau. En revanche, pour les opérations de finition, les vitesses de coupe peuvent être augmentées afin d'obtenir une finition de surface de haute qualité tout en maintenant des tolérances serrées.

Cette approche stratégique dans la planification des opérations d'usinage vise à optimiser l'efficacité du processus tout en garantissant la qualité et la précision des pièces produites [1].

1.2.1 Paramètres de coupe

Chaque étape d'usinage exige une analyse minutieuse pour déterminer la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe. Ces décisions sont d'une importance capitale car elles influencent directement toutes les variables dépendantes du processus. Étant donné l'interdépendance complexe de ces paramètres, une considération approfondie de multiples facteurs est nécessaire pour une sélection adéquate. La nature des matériaux de la pièce et de l'outil, ainsi que le volume total de matériau à enlever, figurent parmi les éléments essentiels à prendre en compte. Ces éléments constituent des variables d'entrée fondamentales qui orientent la détermination des vitesses, des avances et des profondeurs de coupe appropriées.

Il est donc crucial de mener une analyse exhaustive de ces paramètres initiaux avant de prendre des décisions concernant les ajustements spécifiques de l'usinage. Par exemple, le choix de la vitesse de coupe peut être conditionné par la composition et la densité du matériau de la pièce, ainsi que par les caractéristiques de l'outil de coupe utilisé. De même, l'avance et la profondeur de coupe doivent être adaptées en fonction des exigences spécifiques de chaque processus d'usinage, en prenant en considération les propriétés mécaniques des matériaux impliqués et les tolérances requises pour la pièce finale [2].

a) Vitesse de coupe

La vitesse de coupe, désignée par V_c , est définie comme la vitesse relative entre l'outil de coupe et la surface de la pièce. Cette valeur est intimement liée au diamètre de l'outil, noté D , et à la vitesse de rotation de la broche, représentée par N , tel qu'exprimé dans l'équation I.1.

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

b) Vitesse d'avance

L'avance correspond au déplacement de l'outil en synchronisation avec la rotation de la pièce lors de la formation du copeau. En pratique, la vitesse de déplacement de l'outil, représentée par V_f , est déterminée par le nombre de tours effectués par la pièce. Cette relation est exprimée par l'équation I.2 et représente la vitesse à laquelle l'outil se déplace le long des axes longitudinal et transversal par rapport à la structure de la machine.

$$V_f = f \times N \quad (I.2)$$

c) "Profondeur de passe"

La profondeur de coupe, également connue sous le nom de profondeur de passe, fait référence à la distance radiale à laquelle l'outil de coupe s'enfonce dans le matériau avant que le mouvement d'avance ne débute, comme illustré dans la Figure II.1. Cette mesure, désignée par a_p , est généralement exprimée en millimètres.

Il est crucial de sélectionner la profondeur de coupe appropriée en tenant compte des caractéristiques du matériau à usiner, de la géométrie de la pièce et des conditions de coupe. Une profondeur de coupe excessive peut entraîner une surcharge de l'outil, une augmentation de la température et des vibrations indésirables, compromettant ainsi la qualité de la pièce et réduisant la durée de vie de l'outil. D'un autre côté, une profondeur de coupe insuffisante peut prolonger le temps d'usinage et entraîner une usure prématurée de l'outil.

Par conséquent, le choix prudent de la profondeur de passe est essentiel pour optimiser les performances de l'usinage, garantissant des résultats de haute qualité tout en maximisant l'efficacité du processus. Les avancées technologiques dans le domaine de l'usinage ont permis le développement de techniques permettant d'ajuster la profondeur de coupe en temps réel, en fonction des variations des conditions de coupe et des caractéristiques de la pièce, contribuant ainsi à améliorer la précision et la productivité des opérations d'usinage.

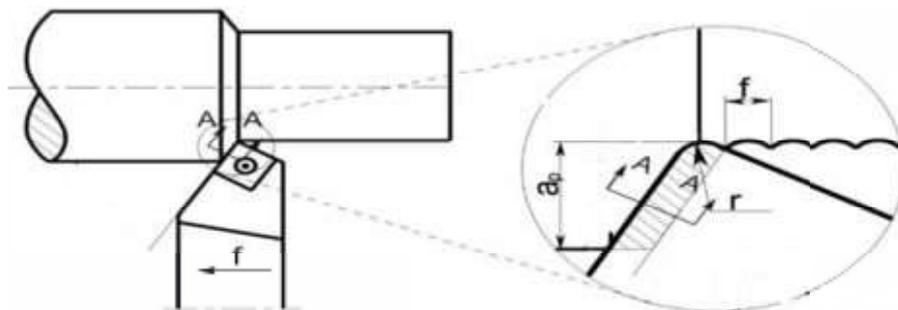


Figure I.2 Paramètres de coupe [48]

I.3 Outil de coupe

Un outil de coupe, doté d'une ou plusieurs arêtes tranchantes, est conçu dans un matériau plus dur que celui de la pièce à usiner. L'arête de coupe de l'outil est cruciale, car elle est chargée de séparer le copeau du matériau de la pièce. Deux surfaces principales de l'outil jouent un rôle essentiel : la face de dépouille et le flanc. La face de dépouille, orientée à un angle spécifique appelé angle de dépouille α , guide le flux du copeau, mesuré par rapport à un plan perpendiculaire à la surface de la pièce. D'autre part, le flanc de l'outil offre un dégagement entre l'outil et la surface de la pièce en cours d'usinage, protégeant ainsi cette dernière contre l'abrasion qui altérerait la qualité de la finition. L'angle de dépouille du flanc est également crucial pour assurer une coupe efficace et une finition optimale.

Dans la pratique, la plupart des outils de coupe présentent des géométries complexes, avec différents types de base. Parmi eux, les outils à pointe unique (figure I.3 (a)) et les outils à multiples arêtes de coupe (figure I.3 (b)) sont les plus courants. Les outils à pointe unique, utilisés notamment pour le tournage, possèdent une seule arête de coupe. En plus des caractéristiques de base, ces outils comportent un point d'outil, à partir duquel leur nom est dérivé. Ce point pénètre généralement sous la surface de la pièce lors de l'usinage et est souvent arrondi à un rayon spécifique, appelé rayon de bec, pour des performances optimales.

D'autre part, les outils à multiples arêtes de coupe sont munis de plusieurs arêtes de coupe et sont généralement utilisés pour des opérations impliquant des mouvements relatifs à la pièce en rotation, tels que le perçage et le fraisage. Par exemple, une fraise hélicoïdale, illustrée dans la figure I.3 (b), est un exemple d'outil à multiples arêtes de coupe utilisé en fraisage. Bien que sa forme diffère considérablement de celle d'un outil à pointe unique, de nombreux aspects de la géométrie de l'outil demeurent similaires, soulignant l'importance de ces principes fondamentaux dans la conception et l'utilisation des outils de coupe [1].



Figure I.3 Outils de coupe

I.3.1 Géométrie de l'outil de coupe

La géométrie de l'outil de coupe (I.4) utilisé lors du tournage revêt une importance cruciale, notamment en ce qui concerne les angles applicables. Parmi ces angles, deux sont

particulièrement essentiels et indépendants du porte-outil : l'angle de coin β et l'angle inclus ε . Des valeurs plus élevées de ces angles confèrent à l'outil une arête plus robuste et favorisent une meilleure dissipation de la chaleur générée au niveau du bord de coupe. Le rayon du bec, noté r , arrondit l'angle de coin et, en interaction avec l'avance, contribue à garantir l'intégrité théorique de la surface usinée.

L'angle de dépouille γ , en revanche, dépend du porte-outil ; un angle de dépouille positif entraîne des forces de coupe moindres mais un bord d'outil plus fragile, tandis qu'un angle de dépouille négatif induit des forces de coupe plus élevées mais confère à l'outil une résistance accrue. L'angle d'inclinaison λ influence quant à lui les forces de coupe et la formation des copeaux. Un angle d'inclinaison négatif assure des conditions de charge plus favorables sur le bord de coupe, mais oriente les copeaux vers la pièce, augmentant ainsi le risque d'endommager la surface usinée.

En outre, l'angle principal du bord de coupe κ et l'angle secondaire du bord de coupe κ_b dépendent étroitement de la géométrie et de la configuration du porte-outil. Ces angles influent sur l'épaisseur théorique des copeaux h_1 et sur leur relation avec la largeur théorique b_1 . La sélection judicieuse de ces paramètres géométriques est donc essentielle pour garantir des performances optimales lors du processus de tournage, en assurant une coupe efficace, une qualité de surface optimale et une durabilité accrue de l'outil.

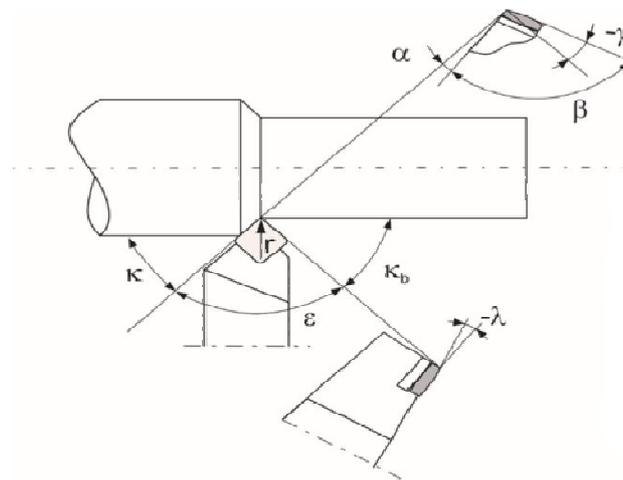


Figure I.4 Géométrie de l'outil de coupe[49]

a) Rayon de bec

Le rayon de bec représente une caractéristique essentielle de la géométrie de l'outil, avec une influence majeure sur plusieurs aspects du processus d'usinage. Il désigne l'angle formé entre le bord de coupe latéral et le bord de coupe terminal de l'outil. La sélection de ce paramètre dépend de la profondeur de coupe (a_p) et de la vitesse d'avance (f), et exerce une

influence significative sur la qualité de la surface usinée, la résistance de l'insert et la formation des copeaux.

Le rayon de bec joue un rôle crucial dans la formation des copeaux ; un rayon plus petit favorise une meilleure rupture des copeaux à une même avance. Ainsi, un petit rayon de bec est recommandé pour des profondeurs de coupe réduites. Cela réduit la résistance de l'insert, tout en évitant les forces radiales indésirables pouvant entraîner des vibrations. Cependant, il convient de noter que tandis qu'un grand rayon de bec associé à une petite avance produit une surface de meilleure qualité, un petit rayon de bec avec de grandes avances laisse plus de matériau non coupé derrière lui, entraînant une finition plus rugueuse.

D'autre part, un grand rayon de bec peut être bénéfique lorsque des valeurs plus élevées d'avance ou de profondeur de coupe sont nécessaires. Bien qu'il renforce la résistance de l'insert, il peut également entraîner une augmentation des forces radiales exercées sur l'outil. Ainsi, le choix du rayon de bec doit être soigneusement évalué en fonction des spécificités de chaque opération d'usinage, en recherchant un équilibre entre la qualité de la surface, la résistance de l'outil et la stabilité du processus.

1.4 Matériaux des outils de coupe

Les outils de coupe jouent un rôle crucial dans les opérations d'usinage, et leur performance dépend largement des matériaux à partir desquels ils sont fabriqués.

1.4.1 Propriétés des matériaux des outils de coupe

Les matériaux utilisés pour fabriquer les outils de coupe doivent être capables de résister à des conditions de coupe extrêmes, telles que les températures élevées générées pendant la formation de copeaux et le frottement entre la pièce et la surface de l'outil. Ainsi, les matériaux des outils de coupe doivent posséder les caractéristiques suivantes pour assurer une qualité optimale [3]:

a) Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des matériaux des outils de coupe sont :

- Haute résistance à la température avec une dureté élevée.
- Excellente résistance à la déformation pour prévenir toute déformation plastique au niveau des arêtes de coupe.
- Grande rigidité pour garantir la précision de l'outil.
- Résistance élevée à la fatigue afin de supporter les charges mécaniques maximales.
- Ténacité exceptionnelle pour éviter toute rupture prématurée.

b) Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques des matériaux des outils de coupe sont :

- Excellente conductivité thermique pour dissiper efficacement la chaleur au niveau des arêtes de coupe.
- Résistance élevée aux chocs thermiques.
- Stabilité de la composition chimique.

c) Propriétés tribologiques

Les propriétés tribologiques des matériaux des outils de coupe sont :

- Grande résistance à l'usure.
- Lubrification appropriée pour prévenir l'accumulation au niveau des arêtes de coupe [3].

1.4.2 Types de matériaux d'outils de coupe

Une gamme variée de matériaux est utilisée comme outils de coupe dans les opérations d'usinage, allant des diamants à l'acier rapide (HSS). Bien que tous les outils de coupe partagent une caractéristique fondamentale de dureté et de résistance, des variations significatives de propriétés existent parmi ces matériaux (voir Figure I.5). Ces distinctions jouent un rôle crucial dans la détermination des applications appropriées pour chaque type de matériau. En effet, le choix du matériau d'outil de coupe adapté dépend de divers facteurs tels que le matériau à usiner, les conditions de coupe et les exigences spécifiques de l'application. Ainsi, comprendre les caractéristiques distinctes de chaque matériau d'outil de coupe est essentiel pour optimiser les performances de l'usinage et garantir des résultats de haute qualité.

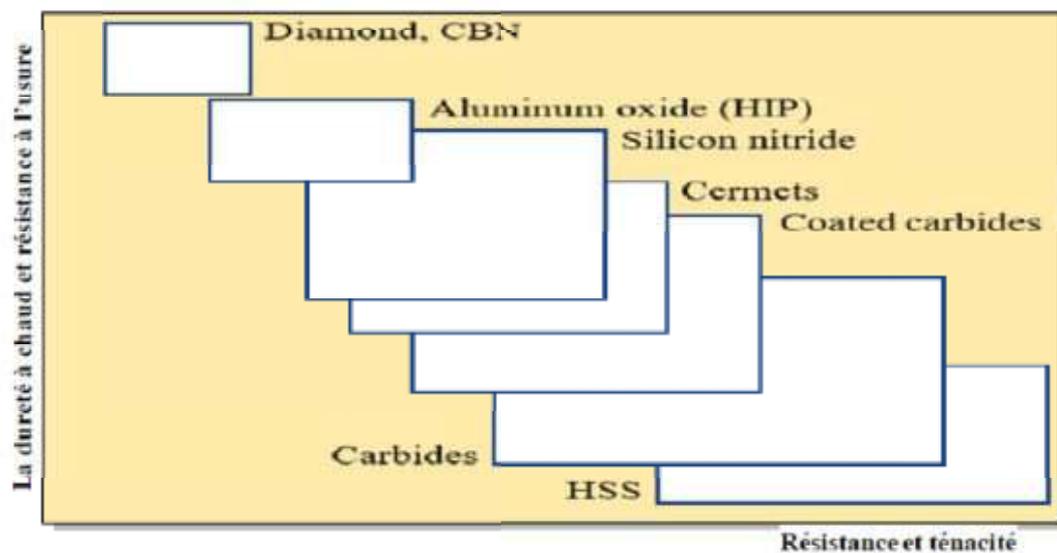


Figure I.5 Types de matériaux d'outil de coupe[50]

a) Aciers rapides (HSS)

Les aciers rapides (HSS) sont une catégorie spéciale d'aciers à haute teneur en alliage. Ils tirent leur nom du fait qu'ils sont utilisés pour des opérations de coupe à grande vitesse [4].

Ces aciers sont des alliages à base de fer du système multiconstituant Fe-C-X, où X représente un groupe d'éléments d'alliage comprenant principalement Cr, W ou Mo, V et Co.

Ils présentent une dureté à chaud rouge, permettant aux outils de couper à une température rouge terne sans perte de dureté ni émoussement rapide du tranchant. L'acier rapide est économique par rapport à d'autres matériaux d'outils, facilement façonné, et il offre une excellente ténacité à la rupture, ainsi qu'une résistance à la fatigue et aux chocs. Cependant, la dureté de l'acier rapide diminue rapidement à des températures supérieures à 540°C–600°C. Les aciers rapides ont une résistance à l'usure moindre, une stabilité chimique réduite et une plus grande propension à former un bourrelet par rapport à d'autres matériaux d'outils.

Leur résistance à l'usure limitée et leur stabilité chimique font des outils en acier rapide des outils adaptés uniquement à des vitesses de coupe limitées. L'acier rapide peut être rectifié avec précision et affûté à l'aide de meules abrasives conventionnelles. Il est largement utilisé pour des outils rotatifs géométriquement complexes tels que des forets, des alésoirs, des tarauds et des fraises. Il est également employé pour des broches, des engrenages et des fraises de formage. Les outils en acier rapide trouvent une utilisation répandue dans des machines à broches multiples (par exemple, des presses à forets à colonne, des machines à vis et des anciennes machines de transfert) présentant une rigidité et des capacités de vitesse limitées [5].

b) Céramiques

Les céramiques sont des matériaux non métalliques, les plaçant ainsi dans une catégorie totalement différente des matériaux d'outils en acier rapide et en carbure. Les outils de coupe en céramique présentent une dureté élevée et des performances supérieures en termes de résistance à l'usure par rapport aux aciers rapides et aux alliages durs. Ils peuvent résister à des températures de coupe dépassant 1600 °C sans subir de décomposition chimique, ce qui les rend plus résistants à la chaleur que les carbures, qui commencent à se ramollir autour de 2200 °C, contre environ 870 °C pour les outils en carbure. Par conséquent, les outils de coupe en céramique sont recommandés pour l'usinage à grande vitesse de matériaux difficiles à couper, en particulier dans des conditions d'usinage à sec.

L'avantage de l'usinage avec des outils de coupe en céramique est généralement observé dans l'obtention de niveaux de finition de surface plus élevés par rapport à ceux obtenus avec

d'autres outils conventionnels tels que les carbures cémentés. Cependant, l'application des outils de coupe en céramique est limitée en raison de leur extrême fragilité. Leur résistance à la rupture transversale (TRS) est très faible, ce qui signifie qu'ils se fracturent plus facilement lors de coupes lourdes ou interrompues. Les premiers outils de coupe en céramique souffraient également d'une faible ténacité et d'une résistance mécanique et thermique réduite en raison de leur faible conductivité thermique.

La couleur des céramiques est généralement noire ou grise dans le cas d'une technique de pressage à chaud et blanche dans le cas d'une technique de pressage à froid. La céramique pressée à froid est légèrement plus dure que celle pressée à chaud [3].

c) Cermets

Les cermets sont essentiellement une combinaison de céramique et de carbure de titane, le terme "cermet" étant dérivé des mots "céramique" et "métal". Ces matériaux, composés d'environ 70 % de céramique et 30 % de carbure de titane, sont souvent décrits comme des composites céramiques ou de carbure, avec des cermets à base de TiC, TiN ou TiCN.

Les premiers cermets étaient constitués de particules de TiC frittées dans un liant en nickel. Les cermets contemporains sont composés de particules de TiC et de TiN frittées avec un liant métallique réfractaire, généralement composé de nickel (Ni), de cobalt (Co), de tungstène (W), de tantale (Ta) ou de molybdène (Mo). Le nickel (Ni) et le molybdène (Mo) sont les liants les plus couramment utilisés, et le volume du liant est généralement compris entre 5 % et 15 %. Des grades sans nickel avec des liants en cobalt ont également été développés [5].

Les cermets présentent une inertie chimique élevée qui limite les phénomènes de cratérisation et d'usure du tranchant. Leur résistance à l'usure et leur ténacité élevée permettent une utilisation en coupe positive, réduisant ainsi les efforts de coupe, assurant des états de surface de qualité et garantissant une grande précision dimensionnelle des pièces usinées. De plus, l'utilisation de lubrification n'est pas obligatoire pour les cermets ; elle est mise en œuvre uniquement lorsque la finition nécessite une précision particulière [6].

d) Carbure

Les matériaux d'outils en carbure comprennent les carbures de silicium et de titane, ainsi que les carbures de tungstène et de titane, ainsi que d'autres composés métalliques (Ti, W, Cr, Zr) ou métalloïdes (B, Si) et carbone. Les carbures présentent une excellente résistance à l'usure et une dureté élevée à chaud.

Les termes "carbure de tungstène" et "carbure fritté" désignent une famille complète de composites de carbures durs utilisés pour les outils de coupe de métaux, les matrices de différents types et les pièces d'usure. Un matériau d'outil en carbure se compose de particules de carbure (carbures de tungstène, de titane, de tantale ou une combinaison de ceux-ci) liées ensemble dans une matrice de cobalt par frittage.

La quantité de cobalt affecte significativement les propriétés des plaquettes en carbure. Normalement, la teneur en cobalt est de 3 à 20 %, selon la combinaison souhaitée de ténacité et de dureté. À mesure que la teneur en cobalt augmente, la ténacité d'une plaquette de coupe augmente tandis que sa dureté et sa résistance diminuent. Cependant, la bonne combinaison de la composition de la plaquette en carbure (qualité), des matériaux de revêtement, de la séquence de couches et de la sélection de la technologie de revêtement appropriée permet d'augmenter considérablement la productivité de la coupe de métaux sans sacrifier la résistance à l'usure de la plaquette.

e) Nitrure de bore cubique (CNB)

Il réalise une synthèse en fonction des conditions pour produire deux formes de nitrure de bore : le nitrure de bore à structure cubique (CBN), qui est la forme la plus dure (présentant la même structure que le diamant), et le nitrure de bore à structure hexagonale, qui a une dureté moindre (présentant la même structure que le graphite).

En général, les outils de coupe en CBN présentent une résistance à l'usure supérieure à celle des autres matériaux d'outils en raison de leur degré élevé de dureté. C'est le matériau connu comme étant le plus dur après le diamant. Il offre une résistance mécanique élevée qui dépend de la nature et de la quantité de liant. Sa dureté reste élevée même à des températures élevées (jusqu'à 1 000 °C), ce qui permet de travailler à des vitesses de coupe très élevées et d'usiner des matériaux durs tels que les aciers traités, les fontes alliées (au chrome, au molybdène, etc.), les alliages de revêtement dur, les stellites, les aciers à outils, etc., avec une dureté HRC de 55, soit environ 595 HV. Les outils CBN permettent également l'usinage de matériaux conventionnels tels que les fontes ordinaires, aussi bien en tournage qu'en fraisage. Cependant, similairement au diamant, la réactivité chimique liée à la combinaison matériau usiné/outil de coupe en limite les applications. Les performances observées des outils CBN surpassent celles des céramiques, bien que les outils CBN soient encore 5 à 10 fois plus coûteux à l'achat que les outils en céramique [6].

f) Diamant

Le diamant naturel résulte de la transformation du carbone sous une pression extrêmement élevée et à des températures élevées. Sa grande dureté et sa faible réactivité chimique expliquent sa préservation à travers les siècles. Les propriétés exceptionnelles du diamant naturel en tant qu'outil de coupe résident dans le fait qu'il est le matériau le plus dur connu, avec une résistance à la compression nettement supérieure à celle des autres matériaux. Son faible coefficient de dilatation thermique, inférieur à celui des autres matériaux d'outils, lui confère une excellente résistance aux chocs thermiques. De plus, sa conductivité thermique, la plus élevée de tous les matériaux, facilite l'évacuation de la chaleur de la zone de coupe, de sorte qu'un diamant fraîchement usiné semble froid au toucher. En revanche, sa résilience est faible, le rendant très sensible aux chocs mécaniques.

Le diamant synthétique est produit en soumettant du graphite à des températures et des pressions extrêmement élevées, formant de petits cristaux utilisés dans la fabrication de meules. Dans certains cas, ces cristaux de diamant sont intégrés dans un support en carbure de tungstène pendant le processus de frittage. Contrairement au diamant naturel, le diamant polycristallin (PCD) est isotrope, ce qui signifie qu'il n'a pas de plan de clivage ni de variation de dureté. Bien que sa dureté soit légèrement inférieure à celle du diamant naturel, le PCD reste proche de sa valeur maximale et présente une résilience accrue, ce qui le rend plus résistant aux chocs mécaniques. De plus, il possède une bonne conductivité thermique et électrique. Cependant, tout comme le diamant naturel, le PCD commence à s'oxyder autour de 600 °C à l'air, et à partir de 1 000 °C sous atmosphère protectrice. Sa conductivité thermique élevée peut favoriser une réactivité chimique qui limite ses applications, en particulier avec des métaux spécifiques. Les diamants, qu'ils soient naturels ou synthétiques, sont souvent utilisés pour l'usinage des métaux tendres tels que l'aluminium, le cuivre, le magnésium et le zinc, ainsi que leurs alliages, et également pour les matériaux antifriction. Ils trouvent également leur application dans l'usinage de métaux précieux comme l'or et le platine, ainsi que dans les matières plastiques chargées ou non.

1.5 Outils Revêtus

L'un des progrès les plus révolutionnaires dans l'industrie du façonnage des métaux au cours des trois dernières décennies a été l'introduction de revêtements minces durs et de procédés de diffusion thermique. Ces technologies connaissent une expansion croissante et offrent d'importants avantages à leurs utilisateurs. Aujourd'hui, 50 % des outils en acier rapide (HSS), 85 % des outils en carbure et 40 % des outils super-durs utilisés dans l'industrie sont

revêtus. Une variété de matériaux de revêtement, de méthodes et de configurations d'application sur des substrats ou des outils entiers, ainsi que des combinaisons de revêtements multicouches, sont employés. L'amélioration des performances à des températures élevées constitue un objectif clé pour de nombreux développeurs de matériaux d'outils. Une réponse prometteuse réside dans l'application de revêtements sur la pointe de l'outil pour renforcer ses capacités de coupe. Ces revêtements sont composés de matériaux résistant à la chaleur et à la rupture, prolongeant ainsi la durée de vie de l'outil. Deux méthodes de revêtement largement adoptées sont le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) et le dépôt physique en phase vapeur (PVD) :

I.5.1 Dépôt CVD

Le processus de dépôt physique en phase vapeur (CVD) a fait ses débuts dans les années 1970. Cette méthode se déroule dans une chambre à vide où le matériau de revêtement est appliqué sur un outil par pulvérisation sous vide ou évaporation par arc. Initialement, les revêtements étaient principalement constitués de carbure, suivis du nitrure de titane, du carbonitrure de titane et de l'oxyde d'aluminium. À l'heure actuelle, les inserts enrichis en cobalt revêtus par CVD sont utilisés dans 40 % à 50 % des opérations d'usinage général. Grâce au processus CVD, la plupart des revêtements sont multicouches.

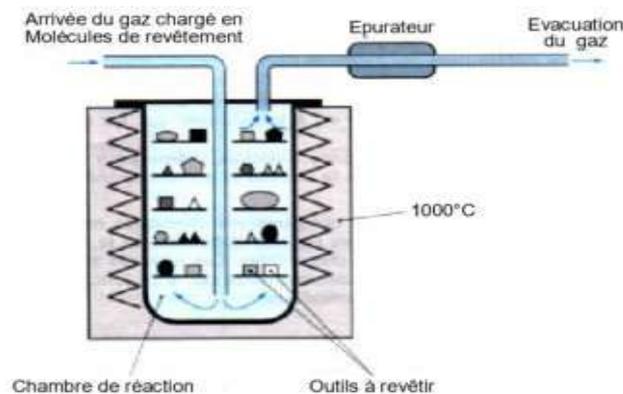


Figure I.6 Processus CVD

I.5.2 Dépôt PVD

Le PVD, ou dépôt physique en phase vapeur, est un procédé de revêtement similaire au CVD, mais il peut être réalisé à des températures d'environ 500 °C (par opposition à 1000 °C pour le CVD) sans affecter négativement l'acier. Initialement développé pour les outils en acier rapide (HSS), le PVD a ensuite été étendu à l'application sur carbure. Ce processus permet la réalisation de revêtements mono et multicouches.

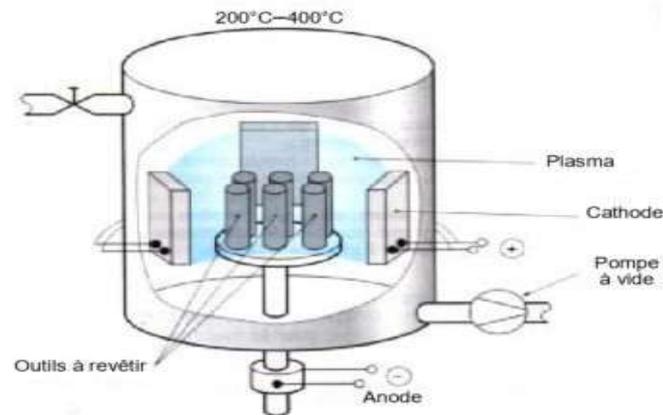


Figure I.7 Processus PVD

Au fil des années, l'industrie de la coupe des métaux a largement bénéficié des avancées technologiques dans le domaine des revêtements minces durs et des procédés de diffusion thermique. Parmi les revêtements les plus utilisés actuellement, trois se distinguent particulièrement :

1. **Nitrure de titane (TiN)** : Reconnaissable par sa couleur dorée, le TiN est apprécié pour sa polyvalence et ses nombreux avantages. Ce revêtement augmente la dureté de surface de l'outil, prolongeant ainsi sa durée de vie. De plus, il offre une meilleure résistance à l'usure et une lubrification accrue, réduisant les frottements et empêchant l'accumulation de matière sur le tranchant. Le TiN est souvent utilisé pour l'usinage d'aciers faiblement alliés et d'aciers inoxydables.
2. **Carbonitrure de titane (TiCN)** : Arborant une teinte grise, le TiCN est encore plus dur que le TiN. Ses principaux avantages incluent une augmentation significative de la vitesse et des avances de coupe (jusqu'à 40 % à 60 % par rapport au TiN), des taux d'enlèvement de matière plus élevés et une résistance à l'usure supérieure. Il est recommandé pour l'usinage d'une variété de matériaux.
3. **Nitrure d'aluminium de titane (TiAlN)** : Ce revêtement apparaît souvent sous forme de teintes grises ou noires et est principalement utilisé pour revêtir les outils en carbure. Le TiAlN peut supporter des températures extrêmement élevées (jusqu'à 800 °C), ce qui le rend idéal pour l'usinage à grande vitesse sans l'utilisation de liquide de refroidissement. Il est particulièrement efficace sur les aciers trempés, les alliages de titane et de nickel, ainsi que sur des matériaux abrasifs tels que la fonte.

L'introduction de revêtements céramiques a également révolutionné le domaine de l'outillage. Ces revêtements combinent les propriétés exceptionnelles des céramiques, telles que la résistance à l'usure, la résistance thermique et la résistance à la corrosion, avec celles des matériaux de base. Ils offrent ainsi une durée de vie accrue des outils en réduisant la résistance à l'usure et le coefficient de frottement, ce qui améliore considérablement les performances des outils [7].

1.6 Température de coupe

Dans le domaine de l'usinage des métaux, la chaleur générée à la pointe de l'outil de coupe revêt une importance cruciale pour garantir la performance de l'outil et la qualité du produit final. Cependant, l'impact de la température de coupe, surtout lorsqu'elle atteint des niveaux élevés, peut être dévastateur tant pour l'outil que pour la pièce travaillée. Ainsi, comprendre et maîtriser la température à la pointe de l'outil de coupe peut grandement améliorer le processus d'usinage et prolonger la durée de vie de l'outil.

Lorsque la pièce est transformée en copeaux, une quantité considérable de chaleur est générée en raison des transformations énergétiques dans la zone de coupe. Cette température développée joue un rôle crucial, influençant le mécanisme de transformation de la couche usinée de la pièce en copeau, ainsi que les phénomènes d'usure de l'outil de coupe (abrasive, adhésive, diffusive). De plus, la chaleur générée affecte l'ampleur des composantes de la force de coupe et induit des contraintes résiduelles dans différentes parties de la pièce. Ainsi, une connaissance précise de la température développée dans la zone de coupe est essentielle pour optimiser le processus d'usinage et assurer la qualité des pièces produites.

La mesure de la température développée à la pointe de l'outil peut être réalisée de diverses manières, utilisant des techniques de thermographie infrarouge, des capteurs de température intégrés à l'outil, ou encore des simulations numériques sophistiquées basées sur des modèles de transfert thermique. Cette précision dans la mesure et la gestion de la température de coupe permet aux fabricants d'outils et d'usinage d'optimiser leurs processus, réduisant ainsi les coûts liés à l'usure des outils et améliorant la qualité des pièces usinées.

1.6.1 Sources de génération de chaleur

Lors des opérations d'usinage, la chaleur est produite au point de coupe à partir de différentes sources, ce qui entraîne le développement de la température de coupe. Ces sources de chaleur et les mécanismes responsables de l'augmentation de la température de coupe comprennent :

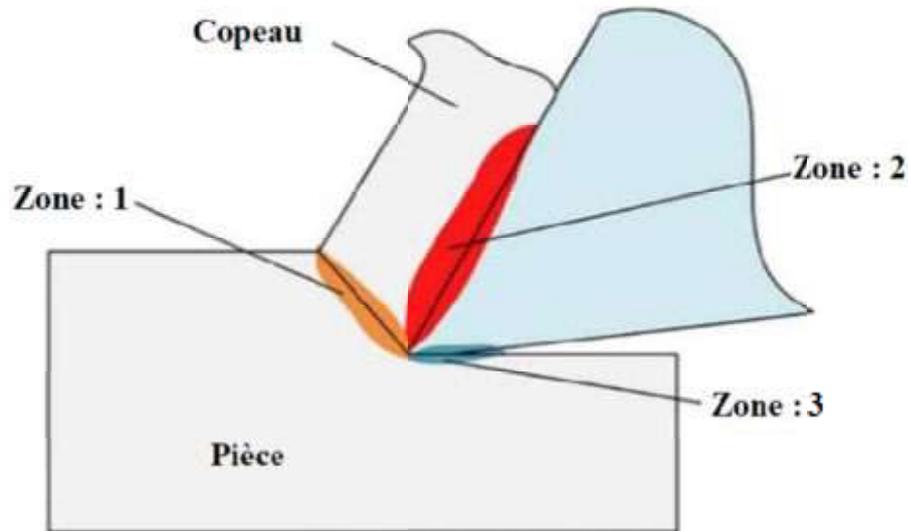


Figure I.8 Sources de génération de chaleur lors d'usinage[51]

1. **Zone de cisaillement primaire (1)** : Cette zone est le lieu principal où l'énergie de coupe est convertie en chaleur. Lorsque l'outil entre en contact avec la pièce, une grande quantité d'énergie est libérée à mesure que les copeaux sont formés par cisaillement. Cette transformation énergétique conduit à une augmentation significative de la température dans la zone de coupe.
2. **Zone de déformation secondaire (2)** : Située à l'interface entre le copeau et l'outil, cette zone génère une chaleur supplémentaire en raison du frottement ou du cisaillement qui se produit pendant le processus d'usinage. L'action de déformation du matériau de la pièce entraîne une augmentation de la température à cet endroit.
3. **Flancs de l'outil (3)** : Enfin, la friction entre les flancs de l'outil et les surfaces usinées de la pièce entraîne également la génération de chaleur. Ce frottement continu pendant le processus d'usinage contribue à l'élévation de la température sur les surfaces finies.

Ces différentes sources de chaleur agissent de manière combinée pour augmenter la température de coupe pendant l'usinage. Comprendre ces mécanismes et leurs implications thermiques est essentiel pour optimiser les conditions de coupe, prolonger la durée de vie de l'outil et garantir la qualité des pièces usinées. Par conséquent, des stratégies de refroidissement efficaces et une gestion appropriée de la température de coupe sont fondamentales pour améliorer les performances globales des processus d'usinage.

1.6.2 Effets de la température de coupe élevée

Les conséquences de la température de coupe, notamment lorsqu'elle est élevée, peuvent être préjudiciables tant pour l'outil que pour la pièce usinée. Bien que la majeure partie de la chaleur générée soit emportée par les copeaux, il est essentiel de veiller à ce que ces copeaux évacuent autant de chaleur que possible, laissant ainsi une quantité minimale de chaleur susceptible de nuire à l'outil et à la pièce. Les effets néfastes potentiels de la température de coupe élevée sur la zone de coupe comprennent :

- **Usure rapide de l'outil** : La température élevée peut accélérer l'usure des arêtes de coupe, réduisant ainsi la durée de vie de l'outil et nécessitant un remplacement fréquent.
- **Déformation plastique des arêtes de coupe** : Si le matériau de l'outil n'est pas suffisamment dur et résistant, il peut subir une déformation plastique, compromettant ainsi la précision et l'efficacité de l'usinage.
- **Écaillage thermique et fracturation des arêtes de coupe** : Les chocs thermiques causés par des variations rapides de température peuvent entraîner des fissures et des écaillages sur les arêtes de coupe, compromettant leur intégrité structurelle et leur efficacité.
- **Formation d'une arête rapportée** : Une température de coupe excessive peut conduire à la formation d'une arête rapportée, où le matériau usiné adhère à l'arête de coupe, entraînant des problèmes de finition de surface et d'exactitude dimensionnelle.
- Parallèlement, la température de coupe peut également avoir des effets néfastes sur la pièce usinée, notamment :
 - **Inexactitude dimensionnelle de la pièce** : Les variations de température pendant l'usinage peuvent provoquer une distorsion thermique et une expansion-contraction de la pièce, entraînant des erreurs dimensionnelles indésirables.
 - **Dommages de surface** : L'élévation de la température peut provoquer l'oxydation, la corrosion rapide ou même la brûlure de la surface de la pièce, compromettant ainsi sa qualité esthétique et fonctionnelle.
 - **Induction de contraintes résiduelles et de microfissures** : La température de coupe peut induire des contraintes résiduelles en traction ainsi que des microfissures à la surface et en sous-surface de la pièce, affectant sa durabilité et sa résistance structurelle.

Cependant, il convient de noter que malgré ces effets néfastes, une température de coupe élevée peut contribuer à réduire l'ampleur de la force de coupe et la consommation d'énergie de coupe en ramollissant ou en réduisant la déformation par cisaillement, ce qui peut être bénéfique dans certains cas d'usinage [8].

1.7 Tribologie des outils de coupe

La tribologie des outils de coupe représente une composante essentielle de la tribologie du travail des métaux, se concentrant spécifiquement sur l'outil de coupe lui-même et étant donc cruciale pour sa conception et sa performance optimales. La représentation graphique du tribosystème de l'outil de coupe, illustrée dans la figure I.8, met en évidence l'interconnexion complexe entre la géométrie, la mécanique et la physique de cet ensemble. Il est erroné de considérer séparément chacun de ces aspects, car ils sont intrinsèquement liés et interagissent de manière dynamique.

Par exemple, toute modification de la géométrie de la face de coupe de l'outil, comme la restriction de la longueur de contact et/ou de l'angle de dépouille, aura un impact direct sur la distribution des contraintes à l'interface copeau de l'outil, ce qui peut à son tour influencer la température de contact. Ainsi, l'objectif central de la tribologie des outils de coupe réside dans l'optimisation des conditions tribologiques aux interfaces outil-copeau et outil-pièce à usiner.

Une compréhension approfondie de ces conditions et leur utilisation judicieuse dans la conception des outils de coupe devraient se traduire par une amélioration globale de l'efficacité du système de coupe. De plus, cela devrait permettre de réduire les défaillances prématurées des outils, un problème critique dans les environnements de production modernes, notamment les lignes de production automatisées et les cellules de fabrication.

Ces résultats de recherche peuvent être appliqués de manière significative dans plusieurs domaines, notamment le choix approprié du régime d'usinage, la conception précise de l'outil (y compris sa géométrie) et la sélection des matériaux d'outil, y compris les revêtements de surface. En intégrant ces connaissances dans les processus de fabrication, les entreprises peuvent optimiser leur production, améliorer la qualité des pièces usinées et prolonger la durée de vie des outils, contribuant ainsi à une efficacité opérationnelle accrue et à une compétitivité renforcée sur le marché.

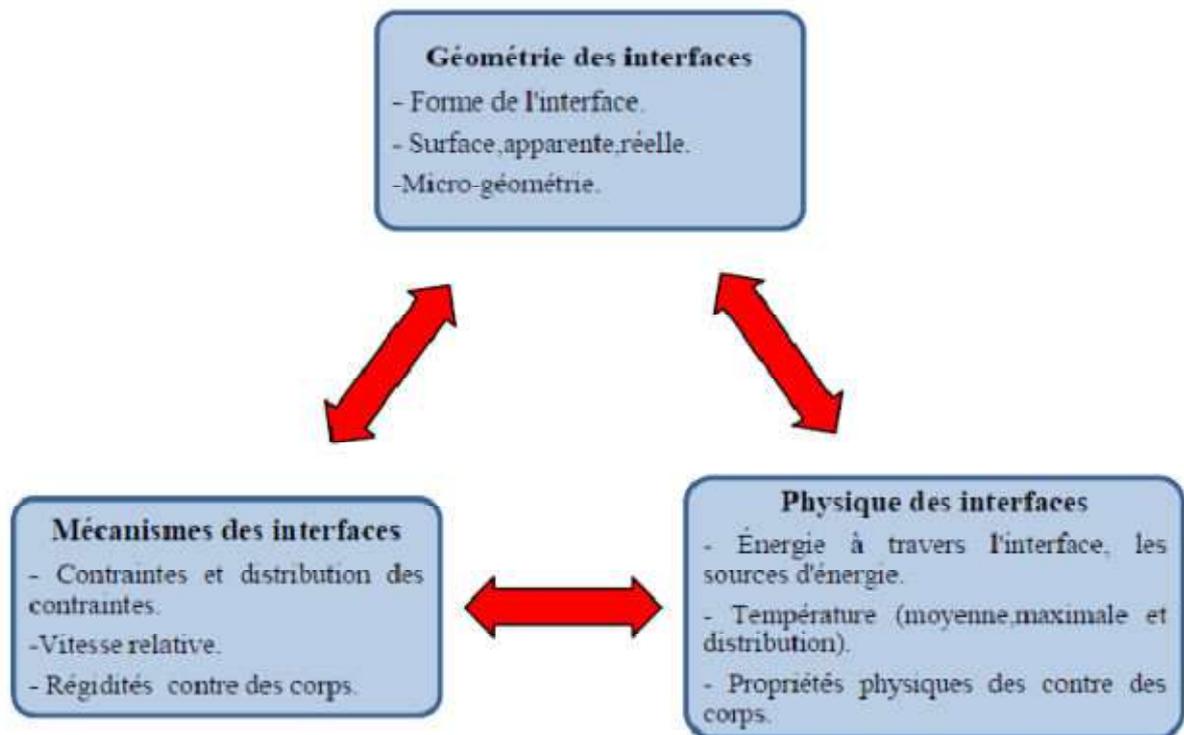


Figure I.9 Illustration visuelle du tribosystème de l'outil de coupe

I.8 Endommagement des outils de coupe

Au cours du processus d'usinage, les outils de coupe subissent des forces significatives résultant de la déformation lors de la création des copeaux et du frottement entre l'outil et la pièce. La chaleur générée dans ces zones de déformation et de frottement peut surchauffer l'outil, le copeau et même partiellement la pièce elle-même. Toutes les surfaces de contact impliquées sont généralement propres mais très réactives chimiquement ; ainsi, le processus de coupe est étroitement lié à des phénomènes physico-chimiques complexes. L'usure des outils, qui découle de ces processus, se manifeste par une dégradation progressive des particules à la surface de l'outil. En conséquence, comprendre ces interactions tribologiques est essentiel pour optimiser la conception des outils et améliorer leur durabilité dans des environnements d'usinage divers et exigeants [9].

L'usure est un processus extrêmement complexe et indésirable, influencé par une multitude de facteurs. En plus des propriétés mécaniques et chimiques des matériaux en contact, des paramètres tels que la pression et la vitesse interfaciale jouent un rôle crucial dans le développement de l'usure. De plus, d'autres éléments présents dans l'environnement de fonctionnement, tels que les couches de lubrifiant ou les gaz, peuvent également avoir un impact significatif sur le processus d'usure.

Ces facteurs ne déterminent pas seulement le taux d'usure, mais également le mécanisme par lequel le matériau est enlevé, la morphologie de la surface usée et les caractéristiques des débris résultant du processus d'usure. Comprendre ces interactions complexes est essentiel pour développer des stratégies efficaces de prévention de l'usure, ainsi que pour concevoir des matériaux et des systèmes tribologiques plus durables et performants dans une variété d'applications industrielles [10].

1.8.1 Mécanismes d'usure

Les processus d'usure peuvent être classés en différents types en fonction du type de charge tribologique et des matériaux impliqués. Ils sont provoqués par une combinaison complexe de mécanismes, parmi lesquels les quatre suivants sont particulièrement importants:

a) Usure abrasive

L'usure abrasive est un phénomène courant dans les opérations d'usinage où des particules dures entrent en contact avec la surface de l'outil de coupe. Ces particules abrasives peuvent provenir de diverses sources, telles que les copeaux générés pendant le processus d'usinage ou les contaminants présents dans le fluide de coupe. Lorsque ces particules abrasives entrent en contact avec la surface de l'outil, elles exercent une action abrasive, provoquant une érosion progressive de la surface de l'outil. [11]

Ce processus d'abrasion entraîne une modification des dimensions de l'outil de coupe, ce qui peut à son tour affecter les dimensions et la qualité de la pièce usinée. Par exemple, une usure excessive des flancs de l'outil peut entraîner des variations dimensionnelles indésirables sur la pièce, tandis que l'usure des encoches peut compromettre l'intégrité de la surface de coupe, affectant ainsi la précision et la qualité de l'usinage. [5].

Il est important de noter que l'usure abrasive peut également conduire à la formation de cratères sur la surface de l'outil. Ces cratères sont souvent causés par l'action des particules abrasives concentrées à des points spécifiques de la surface de coupe. La formation de cratères peut entraîner une détérioration significative de l'outil et réduire sa durée de vie utile.

L'usure abrasive est un processus complexe qui peut avoir des implications importantes sur les performances de l'outil de coupe et la qualité des pièces usinées. Une compréhension approfondie de ce phénomène est essentielle pour optimiser les processus d'usinage et prolonger la durée de vie des outils.

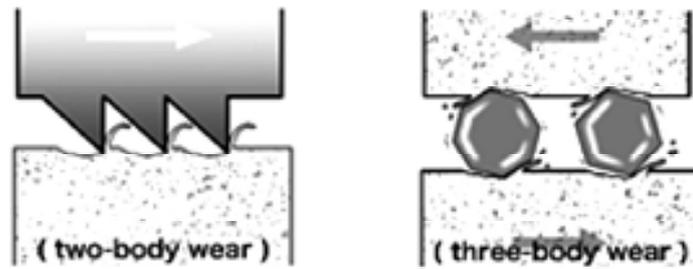


Figure I.10 Usure abrasive [12]

b) Usure par adhésion

L'usure des outils de coupe par adhésion désigne un type spécifique d'usure survenant lorsque des matériaux se fixent à la surface de l'outil pendant le processus d'usinage. Ce phénomène survient généralement sous l'effet de températures élevées engendrées pendant l'opération, induisant une fusion locale entre le matériau à usiner et la surface de l'outil.

Cette adhésion se traduit par l'attachement de particules du matériau à usiner à l'outil, formant ainsi une couche sur sa surface de coupe. Ce dépôt peut entraîner une réduction de l'efficacité de coupe, une augmentation de la friction et une élévation de la température locale, accélérant ainsi l'usure de l'outil.

Pour atténuer l'usure des outils par adhésion, plusieurs techniques peuvent être mises en œuvre, telles que l'application de revêtements résistants à l'adhésion, le choix de vitesses de coupe appropriées et l'utilisation de lubrifiants ou de fluides de coupe pour refroidir la zone de coupe. Ces mesures sont destinées à prolonger la durée de vie de l'outil et à maintenir des performances de coupe efficaces.

L'usure adhésive se produit lorsque deux aspérités entrent en contact. Peu importe la rugosité des deux surfaces, elles ne seront en contact qu'à certains points. La pression locale à ces points est généralement très élevée et dépasse le seuil de limite élastique du matériau le plus mou des deux. Avec l'augmentation de la température du processus, de minuscules soudures se forment à ces points. Au cours du mouvement de glissement, ces soudures sont sectionnées et des fractions du matériau le plus mou adhèrent aux soudures, entraînant l'arrachage de particules. [13]

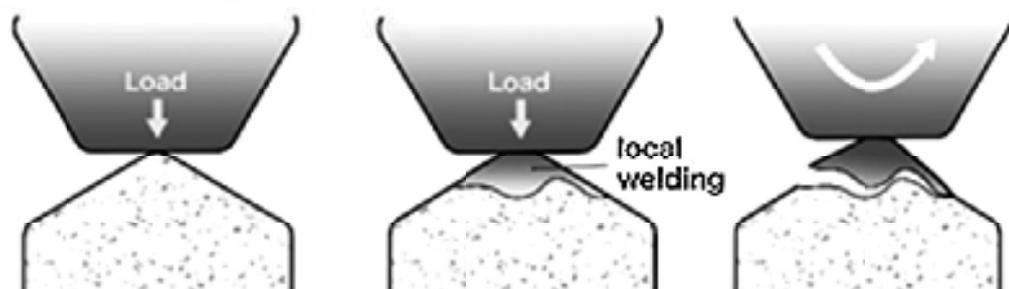


Figure I.11 Usure par adhésion [12]

c) Usure par diffusion

L'usure par diffusion représente un phénomène courant observé dans les opérations d'usinage à haute température telles que le fraisage, le tournage ou le perçage à des vitesses élevées. Ce processus survient lorsque des particules du matériau de la pièce usinée ont tendance à se déplacer vers la surface de l'outil de coupe en raison de la chaleur générée pendant l'opération.

La génération de chaleur pendant l'usinage facilite le transfert de particules du matériau de la pièce vers l'outil de coupe. Cette migration conduit à la formation d'une fine couche de matériau sur la surface de l'outil, constituée d'une combinaison de métaux provenant à la fois de l'outil et de la pièce travaillée. Cette couche, connue sous le nom de "couche d'usure", peut compromettre les performances de l'outil en réduisant son tranchant et en entraînant une détérioration de la qualité de l'usinage.

En plus des procédés de fraisage, de tournage et de perçage, l'usure par diffusion peut également se produire dans d'autres opérations d'usinage impliquant des températures élevées, comme le brochage ou le filetage. Les matériaux de la pièce et de l'outil, ainsi que les paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe et la profondeur de coupe, jouent un rôle crucial dans le degré d'usure par diffusion observé lors de l'usinage.

La gestion efficace de l'usure par diffusion implique l'utilisation de revêtements d'outils appropriés résistants à la diffusion, ainsi que le contrôle précis des paramètres de coupe pour minimiser la génération de chaleur. De plus, l'application de lubrifiants ou de fluides de coupe peut aider à réduire la température de coupe et à limiter le transfert de matériau entre la pièce et l'outil.

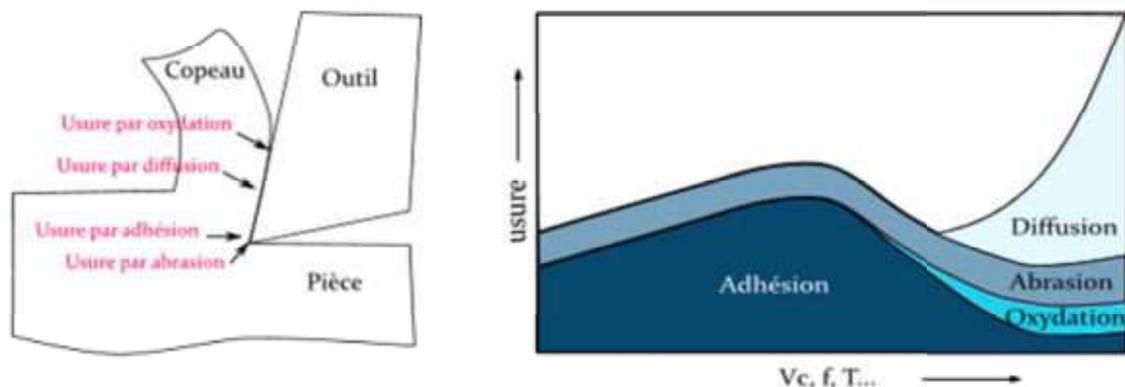


Figure I.12 Mécanismes d'usure[53]

d) Usure par oxydation

À des températures élevées, généralement rencontrées dans des environnements de fonctionnement à haute performance, les surfaces des matériaux peuvent réagir avec

l'oxygène présent dans l'atmosphère, formant ainsi des couches d'oxyde. Ces couches, initialement minces, ont tendance à s'épaissir progressivement au fil du temps en raison de la diffusion des atomes à travers la structure du matériau. Cependant, cette croissance n'est pas uniforme et peut conduire à la formation de défauts, tels que des microfissures ou des discontinuités dans la couche d'oxyde. Sous l'action de contraintes mécaniques et thermiques, ces défauts peuvent se propager, entraînant la fragmentation des couches d'oxyde. Les particules résultantes sont alors susceptibles d'être éliminées des surfaces en mouvement, contribuant ainsi au processus d'usure. Ce phénomène d'usure oxydative joue un rôle significatif dans la genèse de l'usure en entaille et de l'usure en cratère, qui sont des modes courants d'échec dans les applications soumises à des conditions extrêmes. La présence de ces particules et la dégradation des surfaces peuvent entraîner une diminution des performances et une durée de vie réduite des composants mécaniques, soulignant l'importance de comprendre et de contrôler ce processus pour assurer la fiabilité des systèmes. [14]

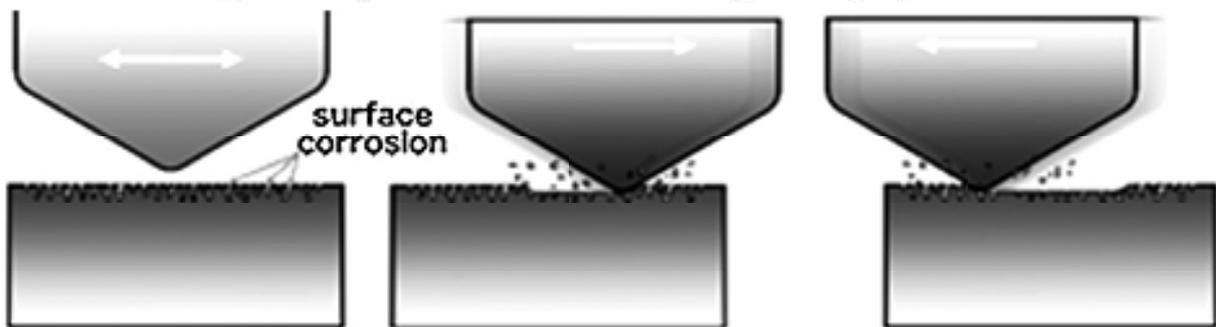


Figure I.13 Usure par oxydation

1.8.2 Formes d'usure

Il existe différentes catégories de détérioration des outils, qui se produisent à divers endroits sur l'outil. Les conditions de fonctionnement, telles que la charge, la vitesse, la température et le matériau usiné, influent sur le type et l'emplacement de la détérioration observée.

a) Usure en dépouille

Cette forme d'usure se présente sous la forme d'une détérioration localisée sur la face principale de dépouille de l'outil, là où il entre en contact direct avec la pièce fraîchement usinée. Ce type d'usure découle principalement de deux mécanismes : l'abrasion, où les particules dures présentes dans le matériau usiné érodent progressivement la surface de l'outil, et l'adhérence, où des fragments du matériau usiné adhèrent à l'outil et s'accumulent au fil du temps. L'impact de cette usure sur les efforts de coupe est significatif, car elle peut entraîner une dégradation de la qualité de la surface usinée ou des dimensions hors des tolérances spécifiées. Pour évaluer et prédire la durée de vie d'un outil de coupe soumis à ce type d'usure,

un paramètre couramment utilisé est V_B , qui représente la largeur moyenne du cratère formé sur la face de dépouille de l'outil. En surveillant et en contrôlant cette usure, les opérateurs peuvent ajuster les paramètres de coupe, tels que la vitesse de coupe ou la lubrification, pour optimiser les performances de l'outil et prolonger sa durée de vie utile. Comprendre les mécanismes et les conséquences de cette usure spécifique est crucial pour garantir des opérations d'usinage efficaces et précises [15].

b) Usure en cratère

Lors d'opérations d'usinage en continu, telles que le tournage, l'usure de cratère se forme généralement sur la face de dépouille de l'outil. Cette usure prend la forme d'une dépression qui suit la courbure de la face inférieure du copeau et atteint sa profondeur maximale à une distance spécifique du tranchant de l'outil, là où la température est généralement la plus élevée. À des vitesses de coupe élevées, l'usure de cratère devient souvent le principal facteur limitant la durée de vie de l'outil de coupe : les cratères sévères affaiblissent le tranchant de l'outil, ce qui peut éventuellement entraîner sa fracturation. Pour prolonger la durée de vie de l'outil et maintenir des performances d'usinage optimales, il est crucial de contrôler cette usure. Cela peut être réalisé en sélectionnant avec soin les paramètres de coupe appropriés, tels que la vitesse de coupe et l'avance, afin de réduire la charge thermique sur l'outil. De plus, l'utilisation d'outils revêtus ou de matériaux d'outils ultra-durs peut contribuer à améliorer la résistance à l'usure de cratère, en offrant une protection accrue à la surface de l'outil contre les effets abrasifs et adhésifs du matériau usiné. En comprenant les mécanismes de formation de l'usure de cratère et en mettant en œuvre des stratégies appropriées pour la contrôler, les opérateurs peuvent prolonger la durée de vie des outils de coupe et maintenir des standards élevés de qualité et de productivité dans les processus d'usinage.

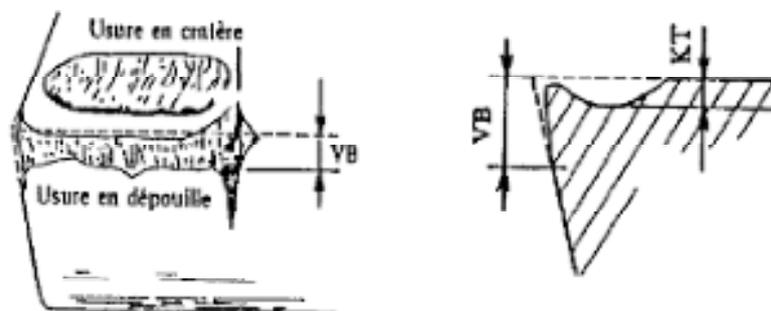


Figure I.14 Types d'usure [52]

I.9 Facteurs influençant la température de coupe des outils revêtus

I.9.1 Épaisseur du revêtement

L'épaisseur du revêtement est un paramètre important pour estimer l'égalité du dépôt de revêtement (force cohésive revêtement-substrat), influençant ainsi le transfert de chaleur et la température de coupe lors du processus de coupe des métaux. Zhang et Liu [16] ont établi le modèle de transfert de chaleur transitoire unidimensionnel de l'outil revêtu monocouche en supposant une température de face de coupe constante comme décrit dans la figure I.15 (a). Les solutions explicites de la distribution de température transitoire à l'intérieur des outils revêtus ont été obtenues. Les résultats calculés ont montré que l'épaisseur importante du revêtement en TiN diminuait la température du substrat et présentait un effet de barrière thermique plus élevé comme illustré dans la figure I.15 (b). De plus, Zhang et Liu [17] ont modifié le modèle thermique en appliquant un flux de chaleur constant sur la face de coupe de l'outil revêtu plutôt qu'une température constante comme illustré dans la figure I.14 (c). Les résultats ont montré que l'épaisseur importante du revêtement en TiC diminuait la température de la face de coupe de l'outil de manière transitoire et présentait un effet de barrière thermique de revêtement supérieur comme illustré dans la figure I.15 (d). Zhao et Liu [18] ont mesuré la température de coupe maximale pendant le processus de tournage stable de l'Inconel 718 avec des outils non revêtus, revêtus de TiAlN (épaisseur de revêtement de 1 et 2 mm) à l'aide d'un pyromètre bi-couleur. Ils ont constaté que l'épaisseur importante du revêtement entraînait une augmentation importante de la température de coupe de 19 à 30 °C par rapport au revêtement mince dans des plages de vitesses de coupe de 30 à 120 m/min au stade initial d'usure de l'outil.

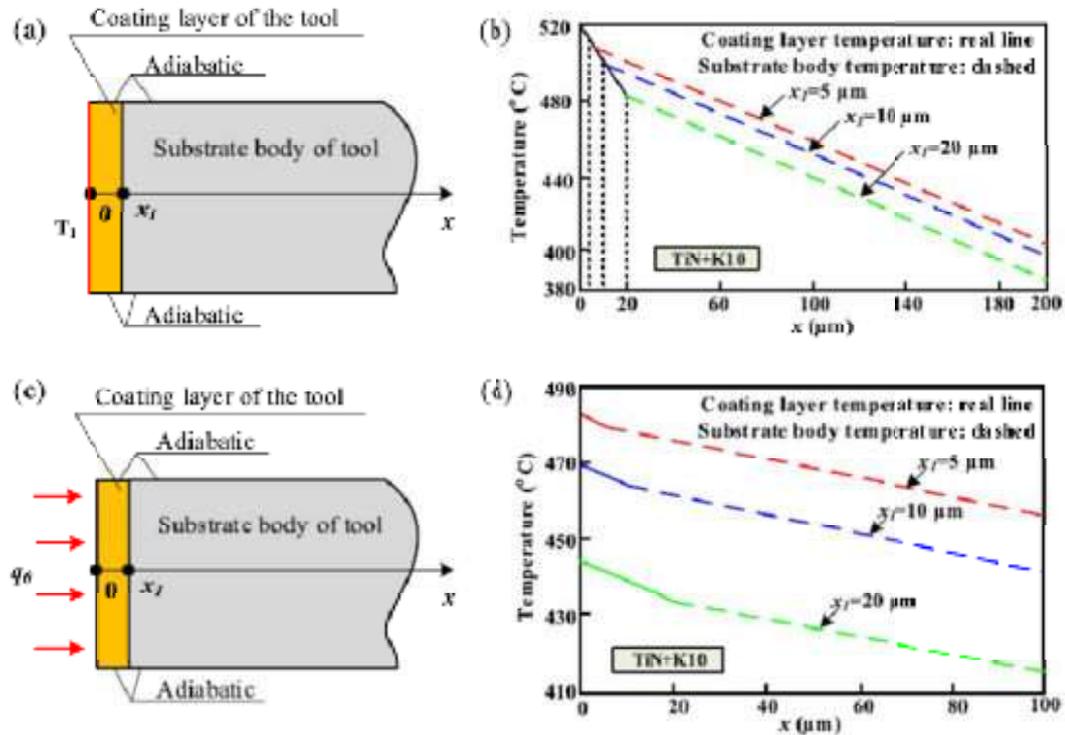


Figure 1.15 (a) Modèle de transfert de chaleur transitoire unidimensionnel d'un outil revêtu [16]; (b) Épaisseur du revêtement en TiN vs. distribution de température [16]; (c) Modèle de transfert de chaleur transitoire unidimensionnel d'un outil revêtu monocouche [17]; (d) Épaisseur du revêtement en TiC vs. distribution de température [17].

1.9.2 Propriétés physiques thermiques

Les propriétés physiques thermiques dépendant de la température de l'outil affectent le transfert de chaleur et la température de coupe lors du processus de coupe des métaux. Rech et al. [19] ont estimé les effets du revêtement sur le processus de transfert de chaleur transitoire à l'aide de modèles analytiques de transfert de chaleur revêtement-substrat en une et trois dimensions, lorsque le flux de chaleur constant est appliqué sur la face de coupe de l'outil. Les résultats ont montré que l'épaisseur du revêtement et la diffusivité thermique du revêtement affectaient le transfert de chaleur transitoire, mais les effets de ceux-ci sur la distribution de la température de coupe transitoire n'ont pas été illustrés. Kusiak et al. [20] ont poussé plus loin la recherche sur la température de l'outil revêtu en se basant sur l'analyse expérimentale et le modèle établi [19]. Ils ont constaté que la température de coupe stable était fortement influencée lorsque la conductivité thermique du revêtement était très différente de la conductivité thermique du substrat, sans illustration théorique.

1.9.3 Frottement à l'interface outil-copeau

Le frottement entre la face de coupe de l'outil et le copeau en mouvement détermine principalement la génération de chaleur dans la zone de déformation secondaire, affectant

ainsi la température de l'interface outil-copeau. Le revêtement de l'outil peut éviter le contact direct entre le substrat de l'outil et le copeau en mouvement, influençant ainsi le frottement outil-copeau et la température de coupe par rapport aux outils non revêtus. Certaines recherches indiquent que la diminution de la température de coupe lors du tournage de métaux avec un outil revêtu est due à la capacité du revêtement à réduire le frottement outil-copeau par rapport aux outils non revêtus. Grzesik [21,22] a mesuré la température moyenne de l'interface outil-copeau lors du tournage de plusieurs aciers avec des outils en carbure P20 non revêtus, revêtus de TiC par CVD, TiC/TiN et TiC/Al₂O₃/TiN, en utilisant un thermocouple outil-pièce. Il a constaté que l'anti-frottement du revêtement influençait la température moyenne de l'interface en modifiant le flux de chaleur généré dans le processus de tournage. Rech et al. [23] ont étudié la température de l'interface outil-copeau lors du tournage à sec de l'acier 27MnCr5 avec des outils en carbure non revêtus, revêtus de TiN PVD, TiAlN et TiAlN + MoS₂. Ils ont constaté que l'isolation thermique du revêtement sur le substrat de l'outil n'était pas significative. Cependant, différents revêtements ont diminué le flux de chaleur généré à l'interface outil-copeau par rapport à celui des outils non revêtus. Une meilleure propriété anti-frottement des revêtements TiN et TiAlN + MoS₂ a été observée par rapport au revêtement TiAlN.

1.9.4 Répartition de la chaleur à l'interface outil-copeau

Le coefficient de répartition de la chaleur à l'interface outil-copeau détermine le rapport de la chaleur dissipée dans le copeau et l'outil, influençant ainsi la température de coupe et les performances de coupe.

La répartition de la chaleur à l'interface outil-copeau est un aspect crucial à considérer dans les opérations d'usinage, notamment lors de l'utilisation d'outils revêtus. Les revêtements sont souvent appliqués sur les outils de coupe pour améliorer leur durée de vie, leurs performances et leur résistance à l'usure. Lorsque l'outil entre en contact avec le matériau usiné, la chaleur générée peut avoir un impact significatif sur la durabilité et l'efficacité de l'outil.

Dans le cas d'un outil revêtu, la chaleur est distribuée de manière différente par rapport à un outil non revêtu en raison des propriétés thermiques du revêtement. Le revêtement agit comme une barrière thermique, limitant la transmission de chaleur de l'interface outil-copeau vers l'outil lui-même. Cela peut aider à réduire l'usure thermique et à maintenir des températures de coupe plus stables, ce qui est bénéfique pour la durée de vie de l'outil et la qualité de la pièce usinée.

Cependant, la répartition de la chaleur peut également être influencée par d'autres facteurs tels que la vitesse de coupe, l'avance, le matériau usiné et les conditions de lubrification. Une mauvaise dissipation de la chaleur peut entraîner un échauffement excessif de l'outil, ce qui peut à son tour affecter négativement ses performances et sa durée de vie.

Pour optimiser la répartition de la chaleur à l'interface outil-copeau avec un outil revêtu, il est essentiel de choisir judicieusement les paramètres de coupe et de maintenir des conditions de lubrification appropriées. En comprenant et en contrôlant efficacement la chaleur générée lors de l'usinage, les opérateurs peuvent maximiser l'efficacité des outils revêtus et garantir des résultats d'usinage de haute qualité.

1.9.5 La résistance thermique de contact à l'interface outil-copeau

La résistance thermique de contact (TCR) à l'interface de contact outil-copeau est induite par les écarts présents dans la zone de glissement, ce qui est un paramètre utile pour étudier et simuler les champs de température de coupe de l'outil et du copeau [80]. Étant donné la difficulté d'analyser directement la TCR pour prédire la distribution de la température de coupe, la conductance thermique de contact (h) à l'interface outil-copeau est proposée pour analyser la TCR, comme indiqué dans l'équation (I.3). La conductance thermique de contact h est utilisée et ajustée dans les modèles de simulation par éléments finis pour analyser les effets de la TCR ($\sim 1/h$) sur le champ de température de coupe pendant le processus de coupe des métaux.

$$h = \frac{q}{T_1 - T_2} \quad (I.3)$$

Où $T_1 - T_2$ est la chute de température à travers l'interface outil-copeau. q est le flux de chaleur transféré depuis l'interface.

1.9.6 La couche de diffusion substrat-revêtement

De nombreux chercheurs ont vérifié l'existence d'une couche de diffusion à l'interface substrat-revêtement. Kessler et al. [24] ont constaté qu'un équilibre carboné était établi à partir des profils de carbone à l'interface substrat-revêtement. La couche d'interdiffusion a influencé les microstructures et les propriétés des composés revêtement/substrat. Dahan et al. [25] ont déterminé que l'interdiffusion avait lieu dans un système multicouche Ti/TiC sous traitement thermique entre 355 et 550 °C, ce qui affectait les propriétés thermiques du revêtement. Li et al. [26] ont déterminé que l'épaisseur de la couche de diffusion à l'interface liquide/solide (Zn/Cu) changeait sous différentes conditions de champ magnétique. Grzesik [27] a utilisé l'analyse par spectrométrie de dispersion d'énergie des rayons X (EDX) et a constaté qu'il existe une interdiffusion entre les revêtements et leurs substrats dans les outils en carbure P20

revêtus de multicouches TiC/Al₂O₃/TiN et TiC/Ti(C,N)/Al₂O₃/TiN. Wang et al. [28] ont illustré qu'une conductivité thermique efficace d'un matériau hétérogène était fortement affectée par sa composition et sa structure. La couche de diffusion substrat-revêtement peut influencer les propriétés thermiques du revêtement, ce qui affecte la température de coupe lors du processus de coupe des métaux.

I.10 Synthèse des travaux de mesure de la température de coupe des outils revêtus

Les revêtements d'outil évitent le contact direct entre la pièce et le substrat de l'outil, ce qui affecte la température de coupe et les performances d'usinage par rapport aux outils non revêtus. Cet article présente un état de l'art de la recherche sur les effets du revêtement d'outil sur la température de coupe. Plusieurs points sont résumés comme suit :

La variation de la température de coupe tout au long du processus de coupe des métaux est divisée en état transitoire (état initial) et en état stable, en particulier pour la coupe continue. Thakare et al. [29] ont constaté que la distribution de la température de coupe atteignait un état stable après 5 à 6 secondes pour le tournage des métaux avec des outils revêtus par CVD. La variation de la température de coupe peut être considérée comme l'état transitoire pour le processus de coupe interrompue, y compris le fraisage. Les effets du revêtement sur la température de coupe doivent être analysés et discutés respectivement en état transitoire et en état stable.

Plusieurs facteurs influencent la génération de chaleur, la répartition de la chaleur et le transfert de chaleur lors du processus de coupe des métaux avec des outils revêtus. En général, les revêtements d'outil réduisent le frottement outil-copeau, diminuant ainsi la température de coupe. Les facteurs géométriques, y compris l'épaisseur du revêtement et les couches de revêtement, affectent la température de coupe en modifiant la répartition de chaleur et le transfert de chaleur dans le processus de coupe des métaux.

Le revêtement d'outil présente un effet de barrière thermique en empêchant la chaleur de se dissiper dans le substrat de l'outil en raison de sa conductivité thermique plus faible par rapport à celle du substrat de l'outil. Des différences se produisent pour l'effet du même revêtement d'outil sur le transfert de chaleur et la température de coupe lors de l'usinage de matériaux faciles à usiner (avec une conductivité thermique élevée) et de matériaux difficiles à usiner (avec une conductivité thermique faible). De plus, la couche de diffusion substrat-revêtement modifie les propriétés thermiques de l'outil revêtu, influençant ainsi la température de coupe lors du processus de coupe des métaux.

La couche d'oxydation du revêtement générée en raison de la haute température de coupe peut s'accoupler avec la résistance thermique de contact à l'interface outil-copeau pour empêcher davantage de chaleur de se dissiper dans le substrat de l'outil par rapport à un outil non revêtu, diminuant ainsi la température de coupe dans le processus de coupe des métaux.

La méthode directe est couramment utilisée pour la prédiction de la température de coupe avec des outils revêtus multicouches par la méthode des éléments finis. Pour la modélisation analytique, la méthode des différences finies (FDM) [30, 31, 32, 34, 35] et la méthode des éléments de frontière (BEM) [36, 37], la méthode équivalente est un moyen utile pour analyser les effets des revêtements multicouches sur la température de coupe en améliorant l'efficacité de calcul avec une différence de température raisonnable par rapport à la méthode directe.

Il n'y a pas de différence dans la mesure du champ de température de coupe avec des outils revêtus et non revêtus par caméra infrarouge (IR) et caméra CCD [38, 39, 40, 41, 42].

Les précisions de mesure de la caméra IR et de la caméra CCD sont principalement influencées par l'émissivité thermique du matériau.

Le pyromètre à deux couleurs [43, 44, 45] élimine les effets de l'émissivité thermique sur la précision de la mesure de la température de coupe par rapport à un pyromètre à une seule couleur. Le thermocouple intégré était couramment utilisée pour la vérification des prédictions analytiques et des résultats de simulation. La thermocouple outil-pièce peut obtenir la température moyenne de l'interface outil-copeau dans le processus de coupe des métaux avec un outil revêtu par une calibration nécessaire.

Les travaux émergents sur les outils de coupe intelligents [46, 47] se concentrent principalement sur la mise en œuvre des technologies existantes dans de nouvelles applications pour mesurer les signaux physiques, y compris la force de coupe et la température de coupe. Les outils de coupe intelligents avec refroidissement sont des moyens utiles pour les mesures et le contrôle de la température pendant le processus de coupe afin d'éviter les hausses rapides de température de coupe et d'améliorer les performances de coupe.

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre introductif, nous avons exploré une étude bibliographique approfondie sur divers aspects de l'usinage et des outils de coupe. Nous avons tout d'abord mis en lumière l'importance cruciale de l'usinage et des outils de coupe dans le domaine de la fabrication et de l'ingénierie, soulignant leur rôle fondamental dans la production de composants

mécaniques de haute qualité et dans l'amélioration de la productivité des processus de fabrication.

Nous avons également examiné en détail les principaux facteurs influençant les performances des outils de coupe, notamment le matériau à couper, la vitesse de coupe, les angles de coupe et la température générée lors de la coupe. Nous avons souligné l'importance de comprendre ces facteurs pour optimiser l'efficacité et la précision des outils de coupe, ce qui a un impact direct sur la qualité des produits finis.

Une section spécifique a été consacrée au phénomène d'usure des outils, en mettant en évidence les différents mécanismes et formes d'usure. Nous avons également examiné les modèles mathématiques d'usure des outils de coupe, qui sont essentiels pour prédire la durée de vie des outils utilisés dans divers processus d'usinage.

Enfin, nous avons présenté un état de l'art de la recherche sur les effets du revêtement d'outil sur la température de coupe. Nous avons discuté des facteurs typiques influençant la température de coupe avec des outils revêtus, mettant en lumière l'importance de comprendre ces effets pour optimiser les performances de coupe.

Ce chapitre a posé les bases pour la compréhension approfondie des aspects essentiels de l'usinage et des outils de coupe, ainsi que des recherches récentes sur les effets du revêtement d'outil sur la température de coupe. Ces connaissances serviront de fondement solide pour les chapitres suivants de cette thèse.

Chapitre II

PROCEDURE EXPERIMENTALE

II.1 Introduction

Dans ce chapitre dédié à la procédure expérimentale, nous décrirons en détail l'approche méthodologique mise en place dans le but d'explorer les effets thermiques générés lors des opérations de coupe sur les outils de coupe utilisés. L'analyse de l'augmentation de température à l'emplacement de l'outil de coupe revêt une importance capitale dans le contexte de l'usinage et de la fabrication industrielle, car elle influence directement les performances des outils et la qualité des processus de fabrication.

L'expérience a été conduite sur un tour parallèle de marque EMCO, en utilisant deux types de plaquettes de coupe : l'une en carbure non revêtu et l'autre avec des revêtements (PVD TiN + (Ti,Al)N + TiN). Les essais ont été réalisés lors du processus d'usinage d'une pièce en acier X200Cr12. Cet acier, largement employé dans l'industrie, est un matériau précieux dans divers domaines de l'ingénierie et de la fabrication en raison de ses excellentes propriétés mécaniques et thermiques.

Dans ce chapitre, nous détaillerons également l'ensemble des moyens déployés pour mesurer la température à l'emplacement de l'outil de coupe en utilisant un thermocouple. De plus, nous exposerons en détail les étapes préparatoires des essais, notamment la préparation de l'équipement, le choix des matériaux et l'acquisition des données. Cette méthodologie rigoureuse garantit la fiabilité des résultats obtenus et permet une compréhension approfondie des variations thermiques induites lors des opérations d'usinage.

II.2 Description du matériel utilisé

II.2.1 La pièce

Toutes les mesures de température ont été effectuées sur des pièces cylindriques présentant un diamètre de $D = 40$ mm et une longueur de $L = 600$ mm, comme illustré dans la figure 1. Ces pièces étaient fabriquées en acier X210Cr12, un matériau renommé pour sa teneur élevée en chrome. Cette caractéristique contribue à minimiser les risques de déformation et de variation dimensionnelle lors des traitements thermiques ultérieurs. De plus, cet acier offre une résistance exceptionnelle à l'usure ainsi qu'une capacité de coupe remarquable, ce qui en fait un choix privilégié dans de nombreuses applications industrielles.



Figure II.1 Forme des pièces utilisées lors des essais

a) Désignation

L'acier X210Cr12, également désigné sous différentes normes, est répertorié dans le tableau II.1, mettant en évidence ses propriétés et ses spécifications selon les différentes normes et classifications en vigueur.

Tableau II.1 Désignation de l'acier X200Cr12 selon différentes normes

EURONOME	AISI	AFNOR	W.NR	BS
X200Cr12	D3	Z200Cr12	1.2080	BD3

b) Propriétés physiques

Le tableau II. 2 les propriétés physiques pertinentes de l'acier X200Cr12

Tableau II.2 Propriétés physiques pertinentes de l'acier X200Cr12[54]

Densité	7,7g/cm ³
Module d'élasticité	210 000 MPA
Conductibilité thermique	20 W/m.C°

c) Composition chimique

La composition chimique du matériau employé est détaillée dans le Tableau II.3, fournissant ainsi une vue complète des éléments constitutifs et de leurs proportions présentes dans le matériau.

Tableau II.3 Composition chimique de l'acier X200Cr12[55]

Elément	Cr	C	Si	Mn	Ni	Cu	Mo	P	S
%	12	2	0.310	0.290	0.259	0.162	0.124	0.011	0.009

d) Applications

En raison de sa remarquable résistance à l'usure, l'acier X200Cr12 est fortement préconisé pour une multitude d'applications industrielles exigeantes. Il est fréquemment utilisé dans la fabrication de matrices diverses, de poinçons d'estampage, de cylindres de dessin, de rouleaux de profilage, ainsi que dans la production d'outils pour le frittage, les laminoirs circulaires et les moules pour les plastiques, entre autres. Cette polyvalence en fait

un matériau de choix dans de nombreux secteurs de l'industrie, où la robustesse et la durabilité sont des qualités essentielles.

II.2.2 L'outil de coupe

a) Le porte-plaquette

Le porte-plaquette sélectionné pour notre étude est un modèle bien défini, identifié sous la référence PCLNR/L 2020K09. Ce porte-plaquette spécifique a été choisi en raison de ses caractéristiques techniques et de sa capacité à répondre aux exigences spécifiques de nos essais.

Le PCLNR/L 2020K09 est un porte-plaquette conçu pour offrir une performance fiable et une polyvalence optimale lors des opérations de tournage. Sa conception ergonomique et robuste assure une fixation sécurisée de la plaquette de coupe, permettant une stabilité maximale pendant le processus d'usinage. Cette stabilité est essentielle pour garantir des résultats précis et cohérents tout au long de nos essais.

De plus, le PCLNR/L 2020K09 est compatible avec une large gamme de plaquettes de coupe, offrant ainsi une flexibilité significative dans le choix des outils de coupe appropriés pour chaque application spécifique. Cette polyvalence permet d'adapter l'outil aux différentes exigences de coupe rencontrées dans nos essais, ce qui contribue à optimiser les performances globales du processus d'usinage.

En outre, le PCLNR/L 2020K09 est doté d'un système de fixation rapide et facile, ce qui facilite le remplacement et l'ajustement des plaquettes de coupe selon les besoins de l'opération d'usinage. Cette caractéristique est particulièrement précieuse pour minimiser les temps d'arrêt machine et maximiser la productivité de nos essais.

Le PCLNR/L 2020K09 est un choix idéal pour notre étude en raison de ses performances fiables, de sa polyvalence et de sa facilité d'utilisation. En utilisant ce porte-plaquette, nous sommes confiants de pouvoir mener à bien nos essais et obtenir des résultats précis et significatifs pour notre recherche.



Figure II.2 Outil de coupe utilisé

b) La plaquette

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi d'utiliser deux types de plaquettes rhombiques 80°, fournies par Sandvik Coromant France, un leader reconnu dans le domaine des outils de coupe. Ces plaquettes ont été sélectionnées pour leurs caractéristiques distinctes et leur capacité à répondre aux exigences spécifiques de nos essais.

La première plaquette est une version non revêtue, composée de carbure de haute qualité. Elle est identifiée sous la référence CNMG120404-SF. Cette plaquette offre une durabilité exceptionnelle et une résistance accrue à l'usure, ce qui en fait un choix idéal pour les applications exigeantes d'usinage.

La seconde plaquette est revêtue d'un matériau spécial pour améliorer encore ses performances. Elle est désignée par la référence CNMG120404-M34. Ce revêtement offre une protection supplémentaire contre l'usure et l'abrasion, tout en améliorant les propriétés de coupe de la plaquette. Cette combinaison de revêtement avancé et de géométrie optimisée permet d'obtenir des résultats de coupe plus précis et constants, même dans des conditions de coupe difficiles.

Les paramètres géométriques de ces plaquettes, y compris les angles de coupe, les rayons de nez et les dimensions spécifiques, sont présentés en détail dans la figure II.3. Ces informations sont essentielles pour comprendre et évaluer les performances des plaquettes dans différentes conditions d'usinage.

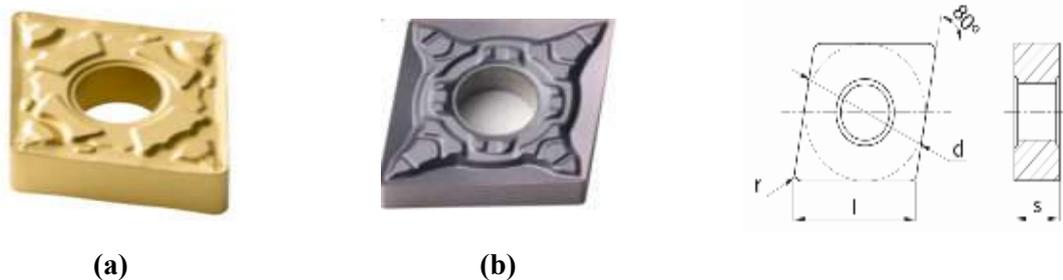


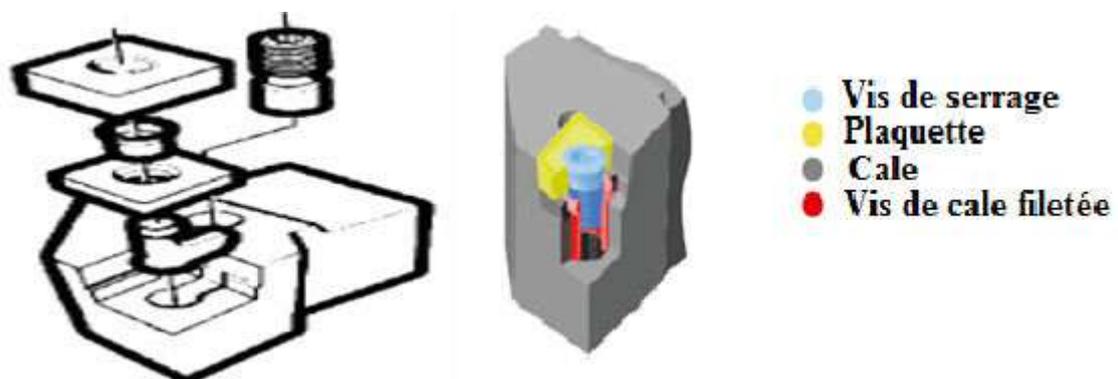
Figure II.3 Caractéristiques géométriques des plaquettes de coupe. (a) Plaquette CNMG120404-M34 revêtue. (b) Plaquette CNMG120404-SF non revêtue.

Le Tableau II.4 compile les spécifications fournies par le fabricant concernant les plaquettes de coupe utilisées dans notre étude. Ces spécifications comprennent une gamme d'informations essentielles telles que les dimensions physiques, les matériaux de fabrication, les références de produit et d'autres caractéristiques techniques pertinentes. Ces données sont cruciales pour une compréhension approfondie des performances et des applications spécifiques de chaque plaquette de coupe, et elles constituent une référence essentielle pour nos travaux de recherche et d'analyse.

Tableau II.4 Caractéristiques fournies par le fabricant des plaquettes de coupe

Désignation	CNMG120404-SF	CNMG120404-M34
Matériau de coupe	Carbure	Carbure
Spécifications de revêtement	Sans revêtement	PVD TiN + (Ti,Al)N + TiN : 4µm
Type de plaquette	Négative	Négative
Dureté	1850HV	1850HV
I	0.488"	0.488"
d	0.5"	0.5"
r	0.16"	0.16"
s	0.187"	0.187"

Le système de fixation de la plaquette utilisé pour l'outil dans nos essais est illustré dans la figure II.4. Ce système, conforme à la gamme spécifique mentionnée, offre plusieurs avantages significatifs. En particulier, il se distingue par sa robustesse, assurant une fixation sécurisée des plaquettes grâce à un levier ou une bride-coin. Cette caractéristique est particulièrement adaptée à l'usinage d'ébauches et à l'utilisation de plaquettes présentant une géométrie négative. Cette configuration garantit une stabilité maximale pendant les opérations d'usinage, contribuant ainsi à des performances optimales et à des résultats précis.

**Figure II.4** Système fixation de la plaquette [3]

II.2.3 La machine

L'équipement employé dans notre étude est un tour parallèle, produit par Emco, équipé de boîtes de vitesse étagées pour une polyvalence optimale. Cette machine offre une large gamme de vitesses de rotation, allant de 30 tr/min à 2500 tr/min, permettant ainsi une adaptation précise aux exigences de chaque opération d'usinage. De même, les avances possibles couvrent une gamme étendue, variant de 0.045 mm/tr à 0.787 mm/tr, offrant une

grande flexibilité pour ajuster la vitesse de progression en fonction des besoins spécifiques de chaque pièce à usiner.

La machine est représentée en détail dans la figure II.5, illustrant sa configuration et ses caractéristiques clés. Cette machine polyvalente et adaptable constitue un choix idéal pour mener à bien nos essais, en offrant une précision et une fiabilité optimales dans toutes les conditions d'usinage.



Figure II.5 Le tour utilisé

II.2.4 Dispositif de mesure de la température

Pour effectuer la mesure de la température de coupe, nous avons utilisé un système de mesure polyvalent : l'interface Cobra3 CHEM-UNIT (figure II.6). Cette interface, contrôlée par un ordinateur, offre une gamme étendue de fonctionnalités au-delà de la simple mesure de température. En effet, elle est capable de réaliser des mesures de pression, de force, de tension, de courant, de pH, et bien plus encore.

L'unité de mesure Cobra3 CHEM-UNIT est équipée des fonctionnalités suivantes :

- Une entrée dédiée aux mesures de conductivité,
- Une entrée pour une sonde de température de type Pt1000, ainsi que trois entrées pour des thermocouples de type K,
- Une entrée réservée aux mesures de pH,

Cette polyvalence permet d'adapter l'interface à diverses applications de mesure, garantissant une flexibilité maximale dans la collecte de données pour une variété de paramètres physiques et chimiques. Grâce à ces fonctionnalités étendues, l'unité Cobra3 CHEM-UNIT offre une solution complète et efficace pour nos besoins de mesure, permettant une analyse approfondie et précise des conditions de coupe.



Figure II.6 Dispositif de mesure de la température

II.2.5 Les thermocouples

Dans les processus d'usinage, une tension thermoélectrique se forme entre l'outil de coupe et la pièce. Dans le cadre de cette étude, la température de coupe à l'intérieur de l'outil est mesurée à l'aide d'un thermocouple, comme illustré dans la Figure II.7. Ce dispositif de mesure est largement répandu dans de nombreux secteurs industriels et scientifiques. Il est composé de deux conducteurs métalliques distincts, habituellement soudés ensemble à une extrémité pour former une jonction de mesure. Lorsque cette jonction est soumise à une différence de température, un courant électrique en millivolts est généré, conformément au principe de l'effet Seebeck. Cette tension est ensuite mesurée par un automate programmable pour afficher la température correspondante.

Il existe plusieurs types de thermocouples, chacun utilisant des matériaux de conducteur différents pour mesurer des plages de températures spécifiques. Parmi les types les plus couramment utilisés, on trouve le type K (chromel-alumel), le type J (fer-constantan), le type T (cuivre-constantan) et le type E (nickel-chrome/constantan). Pour nos essais, nous avons opté pour le type K, qui est le plus répandu et peut mesurer des températures allant de -200°C à $+1250^{\circ}\text{C}$.

L'utilisation du thermocouple de type K dans nos essais garantit une mesure précise et fiable de la température de coupe, même dans des conditions d'usinage extrêmes. Cette méthode de mesure constitue une technique bien établie et largement acceptée pour surveiller et contrôler les températures dans les processus d'usinage industriels.



Figure II.7 Thermocouple de type K.

II.3 Mesure de la température de coupe

La figure II.8 décrit le dispositif typique de thermocouple naturel outil-pièce basé sur les effets thermoélectriques. De nombreux chercheurs ont utilisé le thermocouple outil-pièce pour mesurer la température moyenne à l'interface outil-copeau.

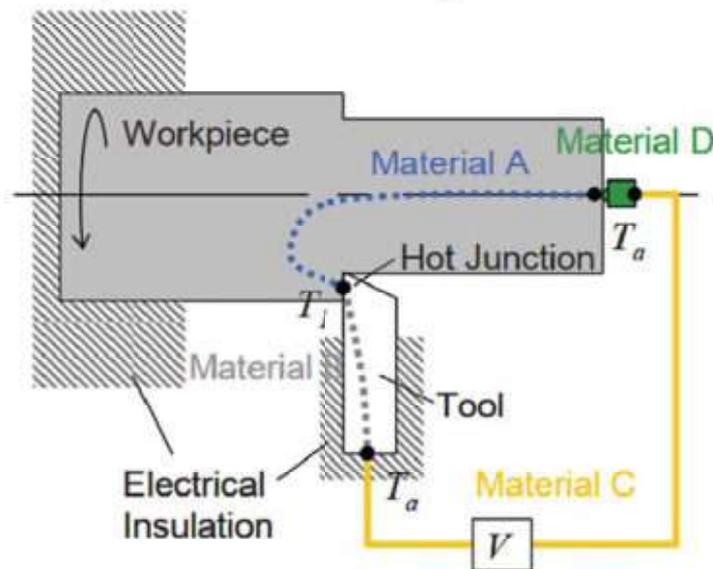


Figure II.8 Disposition typique d'un thermocouple outil-pièce. [37]

Dans de nombreux domaines de la fabrication industrielle, tels que le traitement des matériaux et les processus de test associés, la mesure de la température à l'aide de thermocouples est une méthode courante et fiable. Cette technique de mesure est largement adoptée en raison de sa simplicité, de sa robustesse et de sa capacité à fournir des données précises et cohérentes.

Lorsque le thermocouple est positionné à l'intérieur de l'objet à mesurer, et que cet objet maintient une température constante ou possède une capacité thermique suffisamment grande par rapport au thermocouple, les erreurs de mesure associées au thermocouple peuvent

souvent être négligées. Cette propriété est particulièrement bénéfique dans les applications où la température de l'objet mesuré reste relativement stable, ou lorsque sa capacité thermique est considérablement plus élevée que celle du thermocouple lui-même.

Grâce à cette caractéristique, les thermocouples sont largement utilisés dans une variété de contextes industriels, offrant une solution efficace et économique pour la surveillance et le contrôle des températures. Leur fiabilité et leur précision en font un choix privilégié pour de nombreuses applications de mesure de température dans le domaine de la fabrication industrielle.

II.4 Préparation des essais

La mise en place des expériences implique plusieurs étapes clés, décrites comme suit :

II.4.1 Installation des thermocouples

Pour positionner les thermocouples sur l'outil de coupe, nous avons procédé à la création de deux perforations sur le porte-plaquette. Cette démarche visait à simplifier l'installation et le montage des thermocouples, comme illustré dans la Figure II.9. En facilitant l'accès et le positionnement des capteurs thermiques, cette méthode garantit une précision optimale lors de la mesure de la température de coupe.

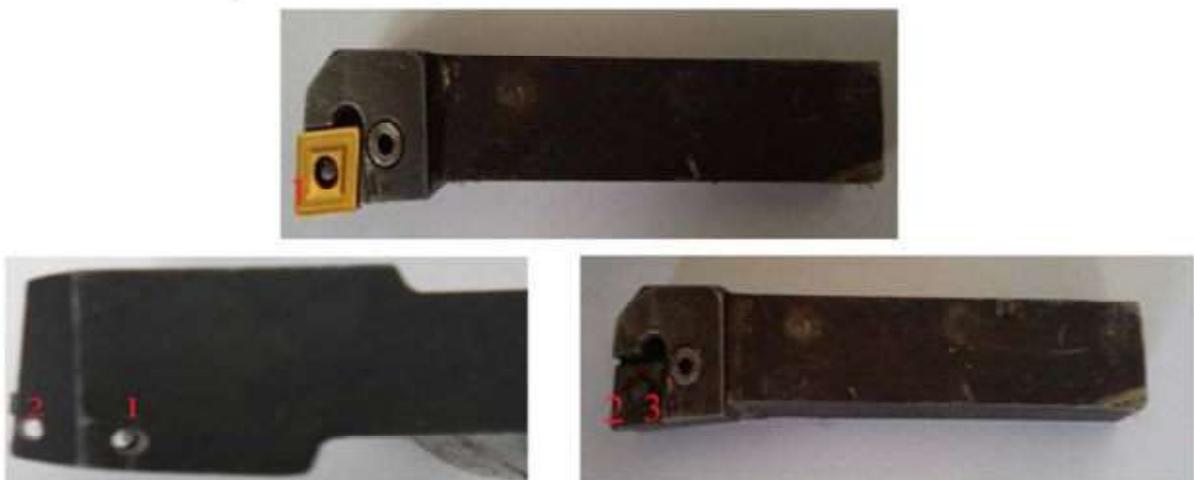


Figure II.9 Installation des thermocouples

Trois thermocouples de type K ont été intégrés dans la plaquette de coupe afin de surveiller l'évolution de la température pendant le processus d'usinage. Les emplacements des thermocouples sur l'outil sont spécifiés dans la Figure II.9 :

- Position 1 : Ce thermocouple est dédié à la mesure de la température T1. Pour assurer une intégration fiable, un adhésif spécial a été utilisé, sélectionné pour ses propriétés de résistance à la pression et à la chaleur élevées, ainsi que sa faible influence sur les signaux électriques.

- Position 2 et Position 3 : Ces thermocouples sont destinés à mesurer respectivement les températures T2 et T3. Ils sont fixés en place par serrage de la plaquette.

Les thermocouples de type K sont installés sur l'outil de coupe conformément aux positions précisées ci-dessus (voir Figure II.9). Par la suite, une procédure de calibration des thermocouples a été réalisée conformément à la norme ASTM E220 (1986), utilisant une technique de comparaison par rapport à une référence ou à une norme externe.

Dans le logiciel dédié, la calibration a été effectuée comme suit : les capteurs de température ont été calibrés individuellement, puis les valeurs T1, T2 et T3 ont été ajustées à la température de référence sélectionnée. Ensuite, le processus de calibration a été validé par l'utilisateur.

Une fois la calibration effectuée, la mesure de la température de coupe avec ces capteurs a été entreprise sur un tour, permettant une surveillance précise des variations de température pendant les opérations d'usinage.

II.4.2 Montage de la pièce

La fixation de la pièce est assurée par un dispositif de montage mixte, également connu sous le nom de montage entre mandrin et pointe, comme illustré dans la Figure II.10. Ce type de montage est souvent utilisé pour usiner des pièces relativement longues. Il implique de maintenir la pièce en l'air à une extrémité, tandis qu'elle est soutenue par la contre-pointe à l'autre extrémité.

Cette méthode de fixation est particulièrement adaptée lorsque la longueur de la pièce est significativement plus grande que son diamètre, c'est-à-dire lorsque $2D < 8L$. Cette configuration permet de stabiliser la pièce pendant l'usinage, garantissant ainsi des opérations précises et efficaces.



Figure II.10 Dispositif de fixation de la pièce

II.4.3 Montage de l'outil

Une fois la plaquette fixée sur le porte-plaquette, l'outil de coupe a été inséré dans le porte-outil avec soin pour garantir un positionnement précis et un alignement correct. Ensuite, un mécanisme de serrage a été activé pour maintenir l'outil en place de manière sécurisée et éviter tout déplacement pendant l'opération d'usinage, comme illustré dans la Figure II.11.

La hauteur de l'outil par rapport à la pièce à usiner a été ajustée à l'aide des dispositifs de réglage prévus sur la machine. Si nécessaire, l'angle de coupe a également été ajusté en utilisant les réglages disponibles sur le porte-outil. Ces ajustements sont cruciaux pour garantir des performances d'usinage optimales et obtenir les résultats souhaités en termes de précision et de qualité de surface de la pièce usinée.



Figure II.11 Dispositif de fixation de l'outil de coupe

Avant chaque essai, la sélection et le réglage des conditions de coupe sur la machine sont effectués conformément à un plan d'expérience préalablement élaboré. Ce plan d'expérience est conçu de manière à ce que chaque paramètre de coupe varie selon quatre niveaux différents. Cette approche systématique permet de couvrir une gamme étendue de conditions de coupe et de capturer efficacement l'impact de chaque paramètre sur les résultats de l'essai.

En ajustant les paramètres de coupe à différents niveaux, nous sommes en mesure d'évaluer de manière exhaustive leur influence sur les performances d'usinage, tout en maintenant un contrôle rigoureux sur les variables expérimentales. Cette méthodologie contribue à une analyse approfondie des effets des conditions de coupe sur les résultats de l'essai, et facilite ainsi la génération de données significatives et fiables pour nos analyses ultérieures.

Le plan d'expérience utilisé dans cette étude est représenté dans le Tableau II.5 pour une profondeur de passe égale à 0.1. Les mêmes valeurs de vitesse de rotation et d'avance sont utilisées pour des profondeurs de passe égales à 0.15, 0.2 et 0.25 mm.

Tableau II.5 Plan d'expérience

Vitesse de rotation N (rpm)	L'avance f (mm/rev)	Profondeur de passe a (mm)
440	0.045	0.1
740	0.045	0.1
900	0.045	0.1
1230	0.045	0.1
1500	0.045	0.1
440	0.084	0.1
740	0.084	0.1
900	0.084	0.1
1230	0.084	0.1
1500	0.084	0.1
440	0.112	0.1
740	0.112	0.1
900	0.112	0.1
1230	0.112	0.1
1500	0.112	0.1
440	0.157	0.1
740	0.157	0.1
900	0.157	0.1
1230	0.157	0.1
1500	0.157	0.1
440	0.18	0.1
740	0.18	0.1
900	0.18	0.1
1230	0.18	0.1
1500	0.18	0.1
440	0.225	0.1
740	0.225	0.1
900	0.225	0.1

1230	0.225	0.1
1500	0.225	0.1

II.5 Acquisition des données

Une fois que tous les équipements sont montés et prêts, le processus de coupe peut être lancé, et simultanément, le processus de mesure de la température commence. Cette synchronisation entre le début de l'usinage et la prise de mesures thermiques est cruciale pour capturer avec précision les variations de température tout au long de l'opération de coupe.

Le système d'acquisition de données pour la mesure de la température de coupe est un composant essentiel de l'ensemble expérimental. Il est conçu pour garantir une collecte précise et fiable des données thermiques pendant les essais. Ce système est composé de divers éléments, tels que des thermocouples de type K, des interfaces de mesure et un logiciel dédié, comme illustré dans la Figure II.12.

Le logiciel "MEASURE", développé par PHYWE, joue un rôle central dans ce processus. Il offre une gamme complète de fonctionnalités pour la collecte, l'analyse et la visualisation des données expérimentales. Non seulement il enregistre les mesures de température prises par les thermocouples, mais il permet également de créer des graphiques, des tableaux et d'autres représentations visuelles pour interpréter les résultats avec facilité.

Grâce à son interface conviviale et à ses outils d'analyse avancés, le logiciel "MEASURE" facilite la manipulation des données expérimentales et garantit une interprétation précise des résultats obtenus. Il constitue ainsi un élément crucial de l'ensemble expérimental, contribuant à la conduite efficace des essais et à la production de données précises et fiables pour les analyses ultérieures.

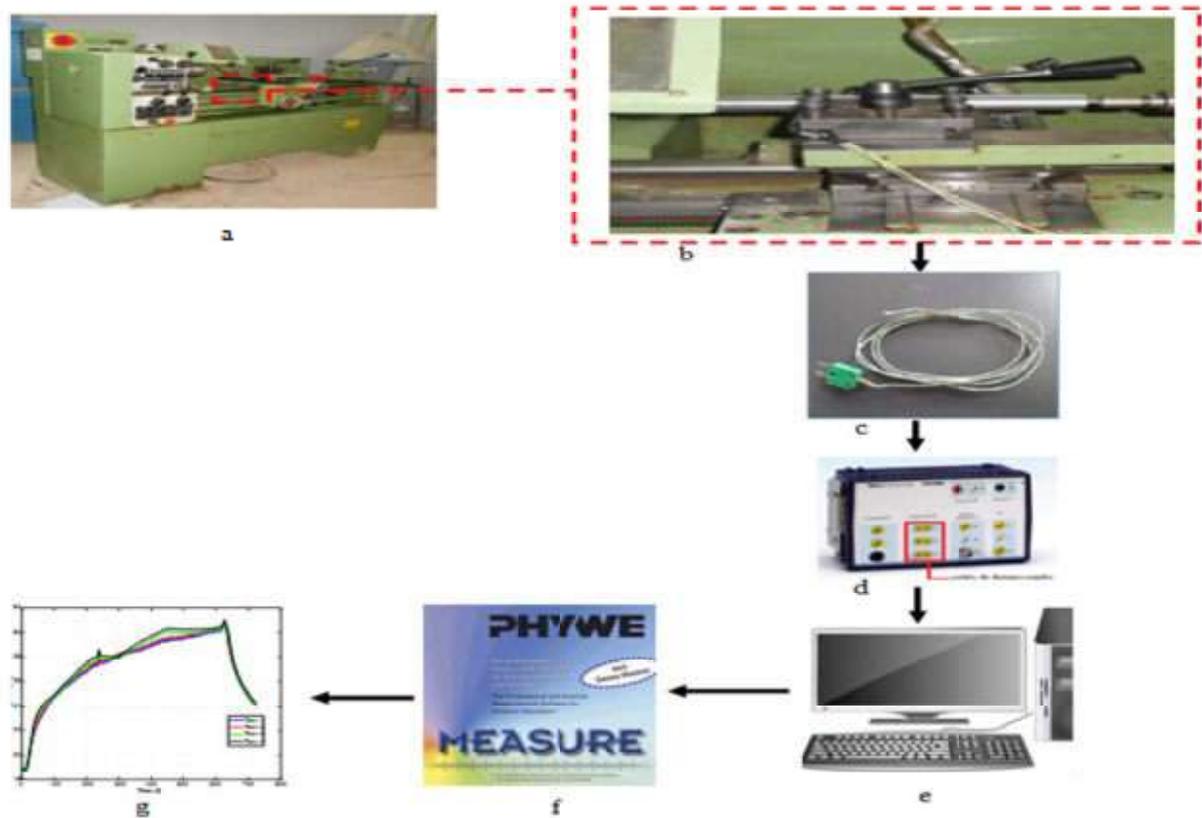


Figure II. 12 Système de mesure de température utilisé dans ce travail ; (a) Tour parallèle, (b) Les thermocouples type K montent sur l'outil de coupe, (c) thermocouple type K, (d) Cobra3 CHEM-UNIT, (e) Ordinateur, (f) logiciel MEASURE, (g) Capture d'écran de la courbe de température donnée.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit en détail le matériel utilisé dans nos expériences d'usinage, mettant en lumière l'importance de chaque composant dans la réalisation de nos objectifs de recherche. À travers l'examen de la pièce usinée, nous avons souligné les caractéristiques de l'acier X210Cr12, un matériau réputé pour sa robustesse, sa résistance à l'usure et ses excellentes propriétés de coupe. Cette pièce cylindrique, fabriquée dans cet acier de haute qualité, a servi de substrat pour nos essais, offrant un support fiable pour évaluer les performances des outils de coupe dans des conditions variées.

Nous avons également examiné en détail l'outil de coupe utilisé, en mettant en évidence les spécifications du porte-plaquette PCLNR/L 2020K09 et les caractéristiques des plaquettes de coupe CNMG120404-SF et CNMG120404-M34. Le choix de cet outil spécifique s'est avéré crucial pour assurer des performances optimales lors de nos essais d'usinage. En combinant la robustesse du porte-plaquette avec les propriétés de coupe distinctes des plaquettes, nous avons pu obtenir des résultats précis et significatifs tout au long de nos expériences.

De plus, nous avons examiné en détail la machine de tournage utilisée, mettant en évidence sa polyvalence et sa capacité à répondre aux exigences spécifiques de chaque opération d'usinage. Avec sa large gamme de vitesses de rotation et d'avances, cette machine nous a offert un contrôle précis sur les paramètres de coupe, contribuant ainsi à la réussite de nos essais.

L'acquisition des données thermiques a été réalisée grâce à un système sophistiqué, intégrant des thermocouples de type K et un logiciel dédié de collecte et d'analyse des données. Ce système nous a permis de capturer avec précision les variations de température pendant le processus d'usinage, offrant ainsi des informations essentielles pour évaluer les performances des outils de coupe dans différentes conditions.

Enfin, nous avons détaillé le processus de préparation des essais, mettant en évidence les étapes clés telles que l'installation des thermocouples, le montage de la pièce et de l'outil, ainsi que la sélection et le réglage des conditions de coupe. Grâce à une approche systématique et rigoureuse, nous avons pu mener à bien nos expériences et obtenir des données précises et fiables pour notre analyse.

Ce chapitre fournit un aperçu complet du matériel et des méthodes utilisés dans notre étude, mettant en lumière l'importance de chaque élément dans la réalisation de nos objectifs de recherche. En combinant une sélection minutieuse du matériel avec une méthodologie expérimentale robuste, nous avons pu obtenir des résultats significatifs qui contribuent à une meilleure compréhension des processus d'usinage et à l'amélioration des performances des outils de coupe.

Chapitre III

***ANALYSE DES RESULTATS
EXPERIMENTAUX***

III.1 Introduction

L'analyse des résultats expérimentaux des essais de tournage constitue une étape fondamentale dans la compréhension des performances du processus de tournage, ainsi que dans l'optimisation des paramètres de coupe. Dans cette analyse, plusieurs aspects doivent être pris en compte pour une évaluation complète et précise des résultats obtenus.

Tout d'abord, Nous commençons par évaluer la fiabilité du dispositif utilisé pour mesurer la température de l'outil de coupe. La précision et la stabilité de thermocouple de type K influencent directement sur la qualité des données collectées. Une analyse de la fiabilité du thermocouple permet d'identifier d'éventuelles sources d'erreur et de garantir la validité des résultats obtenus.

Par la suite, nous exposons l'impact du temps sur la température de coupe pour les deux types de plaquettes utilisées : la plaquette revêtue (PVD TiN + (Ti,Al)N + TiN) et non revêtue. La température de coupe est un paramètre critique qui influence sur le processus de coupe. L'évaluation de l'impact du temps sur la température de coupe permet de comprendre les variations thermiques pendant l'opération de tournage et d'ajuster les paramètres de coupe en conséquence.

Il est important d'analyser l'impact de l'avance, de la vitesse de rotation et de la profondeur de coupe sur l'augmentation de température et les performances du processus de tournage. Ces paramètres jouent un rôle essentiel dans la détermination de la qualité de la surface usinée et la durée de vie de l'outil. L'examen de l'interaction entre ces paramètres permet d'identifier les conditions de coupe optimales pour obtenir les meilleures performances.

Enfin, l'aspect physique des copeaux générés pendant le travail expérimental mérite également une attention particulière. L'observation et l'analyse des caractéristiques des copeaux, telles que leur forme, leur épaisseur, fournissent des informations précieuses sur le comportement du matériau usiné, ainsi que sur la dynamique du processus de coupe.

III.2 Analyse de la fiabilité du dispositif de mesure

L'analyse de la fiabilité du dispositif de mesure de la température de coupe, en utilisant des thermocouples de type K en tournage, vise à évaluer la fiabilité et la précision de ce système de mesure dans un contexte spécifique de processus de fabrication. Le tournage est une opération d'usinage courante dans laquelle un matériau est retiré d'une pièce en rotation pour lui donner une forme spécifique. La température de coupe est un paramètre important dans ce processus, car elle peut influencer la qualité de l'usinage, la durée de vie de l'outil et la

performance globale de la pièce finie. Les thermocouples de type K sont des capteurs de température largement utilisés en raison de leur large plage de température, de leur sensibilité et de leur durabilité. Cette étude implique probablement la comparaison des mesures de température obtenues à l'aide des thermocouples de type K avec des valeurs de référence ou des données provenant d'autres capteurs de température pour évaluer la cohérence et la précision du système de mesure. Les résultats de cette étude fourniront des informations cruciales sur la fiabilité du système de mesure de la température de coupe, ce qui peut permettre aux opérateurs et aux ingénieurs de mieux contrôler et optimiser le processus de tournage pour améliorer la qualité des pièces usinées, prolonger la durée de vie des outils et augmenter l'efficacité globale de la production. La calibration des thermocouples a été réalisée par une technique de comparaison selon la norme ASTM E220 (1986) par rapport à une référence ou à une norme externe. Sur le logiciel, la calibration se déroule comme suit : calibrer les capteurs de température ; sélectionner calibrer, ajuster T1, T2 et T3 à la température de référence ; cliquer sur calibrer et OK. Pour étudier la fidélité du système de mesure, des tests de mesure de température ont été réalisés, avec des conditions de découpe identiques : $a = 0.1\text{mm}$, $f = 0.045\text{ mm/rev}$, $n = 440\text{ rpm}$.

Le Tableau III.1 présente les résultats des tests de reproductibilité du système de mesure de la température de coupe. Ces tests ont été effectués dans des conditions de découpe identiques, avec des paramètres tels que l'avance (a), la profondeur de coupe (f), et la vitesse de rotation de la pièce (n) maintenus constants. Les mesures de température ont été enregistrées à l'aide de thermocouples de type K, et les données obtenues ont été analysées pour évaluer la cohérence et la fiabilité du système de mesure. Les résultats fournissent un aperçu crucial de la précision et de la reproductibilité du dispositif dans des conditions de fonctionnement typiques, offrant ainsi des indications importantes pour son utilisation dans le processus de fabrication.

Tableau III.1 Résultat des tests de reproductibilité du système

Essais	Température (°C)
Essais 1	30.19
Essais 2	30.38
Essais 3	30.27
Essais 4	30.45
Moyenne	30.3225
écart-type σ	0.1

L'écart-type, évalué à 0.1, indique que les valeurs de température relevées dans les quatre essais sont étroitement groupées autour de la moyenne. Cette cohérence des mesures suggère une homogénéité dans la prise des températures. En d'autres termes, les écarts entre les valeurs individuelles et la moyenne sont relativement faibles, ce qui renforce la confiance dans la précision et la fiabilité du système de mesure. Cette constatation est essentielle pour garantir la reproductibilité des résultats dans un contexte de fabrication où des variations minimales peuvent avoir un impact significatif sur la qualité des pièces produites. Ainsi, la cohérence des mesures de température offre une base solide pour l'utilisation continue et efficace du dispositif de mesure dans le processus de fabrication, permettant aux opérateurs d'ajuster et d'optimiser les paramètres de coupe avec une plus grande précision et fiabilité.

III.3 Impact temporel sur la température de coupe : Comparaison entre plaquettes revêtues et non revêtues

Pendant le travail expérimental, il a été remarqué que la température de coupe augmente avec le temps de coupe, conformément aux attentes, en raison de l'accumulation de chaleur générée par le processus de coupe.

Ce phénomène est principalement dû à la friction entre l'outil de coupe et la pièce à usiner, ainsi qu'à la déformation plastique du matériau. Cependant, une fois l'opération d'usinage terminée et qu'il n'y a plus de contact entre l'outil et la pièce, la température de coupe commence à diminuer. Cette diminution est attribuée à la dissipation de la chaleur accumulée dans la pièce et l'outil vers l'environnement, puisque la source de chaleur n'est plus active.

Cette variation de la température de coupe suit une forme similaire pour toutes les expériences, avec les conditions de coupe utilisées (voir *Tableau II.5*). La stabilité de la température de coupe mesurée est obtenue en utilisant de faibles valeurs pour l'avance de l'outil soit **0.045, 0.084, 0.112, 0.157, 0.18, 0.225mm/tr**. En réduisant la vitesse à laquelle l'outil avance à travers la pièce, on limite l'accumulation excessive de chaleur, ce qui contribue à maintenir la température de coupe à des niveaux plus stables.

Dans certaines expériences, en particulier celles avec des avances importantes, le seuil de stabilité de température n'a pas été atteint. Cela peut être attribué à des limitations de l'équipement expérimental, telles que la longueur de la pièce (300 mm) ou les contraintes de la machine utilisée. Pour atteindre la stabilité dans de tels cas, il faudrait des longueurs de pièce plus importantes, ce qui peut ne pas être réalisable dans le cadre des installations disponibles.

L'examen approfondi des courbes de variation de température a conduit à une classification de ces courbes en quatre catégories distinctes en fonction de leurs caractéristiques et de leurs schémas. Cette classification offre une perspective précieuse sur la façon dont diverses conditions et variables de coupe influencent le comportement thermique du processus d'usinage. En comprenant mieux ces relations, il devient possible de diriger les efforts d'optimisation vers des domaines spécifiques du processus où des ajustements peuvent être nécessaires pour améliorer l'efficacité, la qualité et la fiabilité de la production. Cette approche permet ainsi d'identifier des stratégies d'amélioration ciblées pour optimiser les performances du processus d'usinage dans le cadre d'une recherche constante d'excellence opérationnelle.

a) Catégorie 1

La première catégorie de courbes, identifiable par son schéma spécifique, révèle une caractéristique distincte : l'atteinte du seuil de stabilité de la température, comme illustré dans la figure III.1. Ce seuil marque le point où la température de coupe atteint son maximum. Ce type de courbe est généralement observé lorsque les paramètres de coupe tels que la vitesse d'avance, la profondeur de coupe et la vitesse de rotation sont maintenus à des valeurs relativement faibles. Cette constatation souligne l'importance critique de ces paramètres dans la gestion de la température de coupe, car des réglages inappropriés peuvent entraîner une augmentation excessive de la chaleur, compromettant ainsi la qualité de l'usinage et la durée de vie des outils. Comprendre cette relation permet aux opérateurs et aux ingénieurs de mieux contrôler et d'ajuster ces paramètres pour maintenir des conditions de coupe optimales, garantissant ainsi des performances stables et fiables du processus d'usinage.

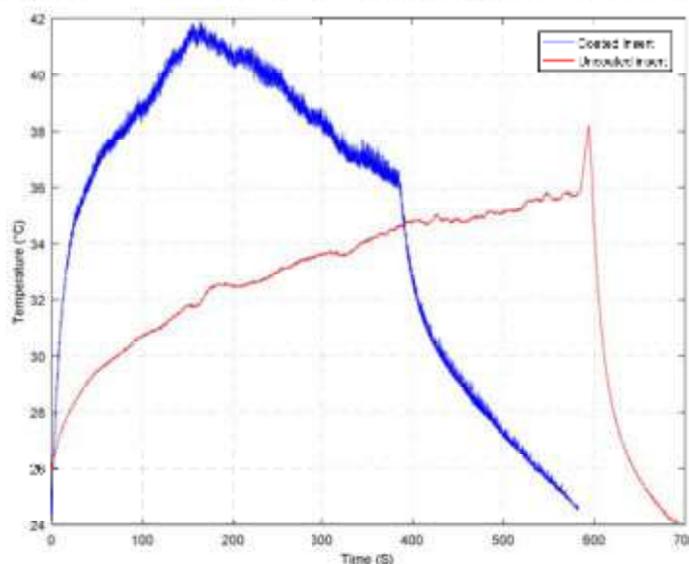


Figure III.1 Température en fonction du temps pour la catégorie 1, avec $f=0.045$ mm/tr, $a=0.1$ mm, et $N=440$ tr/min

b) Catégorie 2

La deuxième catégorie de courbes, distincte par sa configuration, présente une caractéristique notable : l'approche du seuil de stabilité de la température, comme indiqué dans la figure III.2. Bien que ce seuil ne soit pas tout à fait atteint, il est proche. Dans ce contexte, la température de coupe maximale est presque équivalente à celle observée dans la première catégorie de courbes, avec une différence négligeable. Cette tendance suggère que, malgré des variations dans les paramètres de coupe, la température de coupe atteint un niveau similaire, quoique légèrement différent. Ce type de courbe se manifeste généralement lorsque la vitesse d'avance est maintenue à des valeurs moyennes, tandis que la profondeur de coupe est faible et la vitesse de rotation est élevée. Cette observation met en lumière l'importance relative de ces paramètres dans la gestion de la température de coupe, soulignant l'impact significatif de la vitesse de rotation particulièrement élevée dans ce scénario. Comprendre ces nuances permet aux opérateurs et aux ingénieurs d'ajuster plus efficacement les paramètres de coupe pour maintenir des conditions thermiques optimales, améliorant ainsi la qualité de l'usinage et prolongeant la durée de vie des outils.

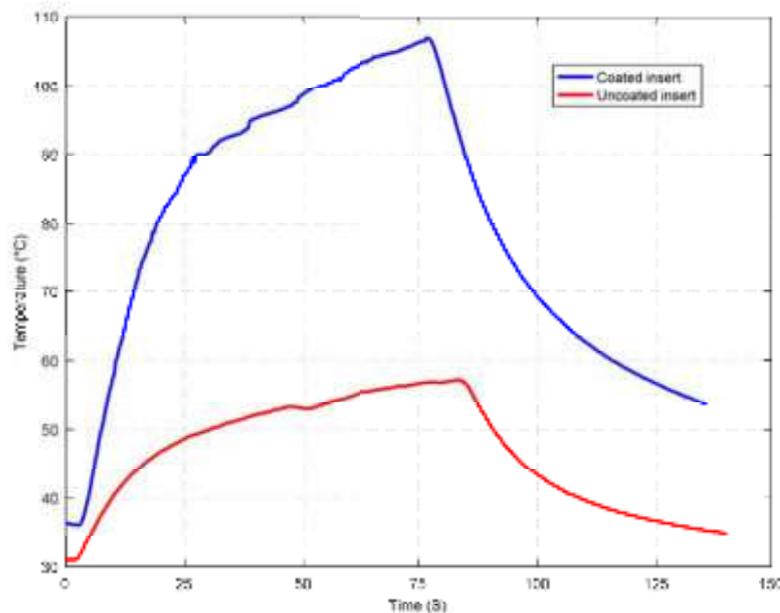


Figure III.2 Température en fonction du temps pour la catégorie 1, avec $f=0.157$ mm/tr, $a=0.1$ mm, et $N=1500$ tr/min

c) Catégorie 3

La troisième catégorie de courbes présente une caractéristique singulière : bien que le seuil de stabilité de la température ne soit pas atteint, comme illustré dans la figure 17, la température de coupe demeure élevée et comparable à la température maximale observée dans d'autres catégories de courbes. Ce phénomène suggère que, malgré l'absence d'atteinte du

seuil de stabilité, le processus génère toujours une chaleur significative. Ce type de courbe se manifeste généralement lorsque les paramètres de coupe sont maintenus à des valeurs moyennes, c'est-à-dire une vitesse d'avance, une profondeur de coupe et une vitesse de rotation modérées. Bien que la température n'atteigne pas son maximum absolu, cette observation met en évidence l'importance de maintenir une surveillance étroite des conditions de coupe même dans des situations où le seuil de stabilité thermique n'est pas franchi. Comprendre cette dynamique permet aux opérateurs et aux ingénieurs de mieux anticiper et de réagir aux variations thermiques, contribuant ainsi à maintenir des performances d'usinage optimales et à assurer la qualité des pièces produites.

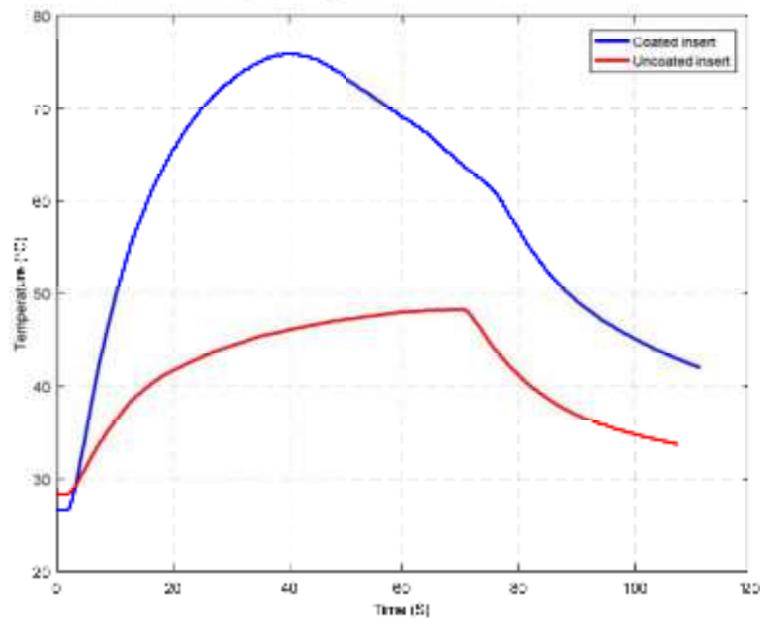


Figure III.3 Température en fonction du temps pour la catégorie 1, avec $f=0.157$ mm/tr, $a=0.15$ mm, et $N=900$ tr/min

d) Catégorie 4

Cette catégorie de courbe présente une particularité où le seuil de stabilité de la température n'est pas atteint, comme illustré dans la figure III.4. De plus, la température de coupe élevée observée dans ce type de courbe ne peut être directement comparée à la température de coupe maximale sur l'ensemble de la courbe. Ces courbes se forment généralement lorsque les paramètres de coupe comprennent des valeurs élevées de vitesse d'avance et de profondeur de coupe, mais une vitesse de rotation moyenne. Ce schéma suggère une dynamique de coupe distincte où l'interaction entre ces paramètres conduit à des conditions thermiques particulières, nécessitant une analyse plus détaillée pour comprendre pleinement leur influence sur le processus de coupe.

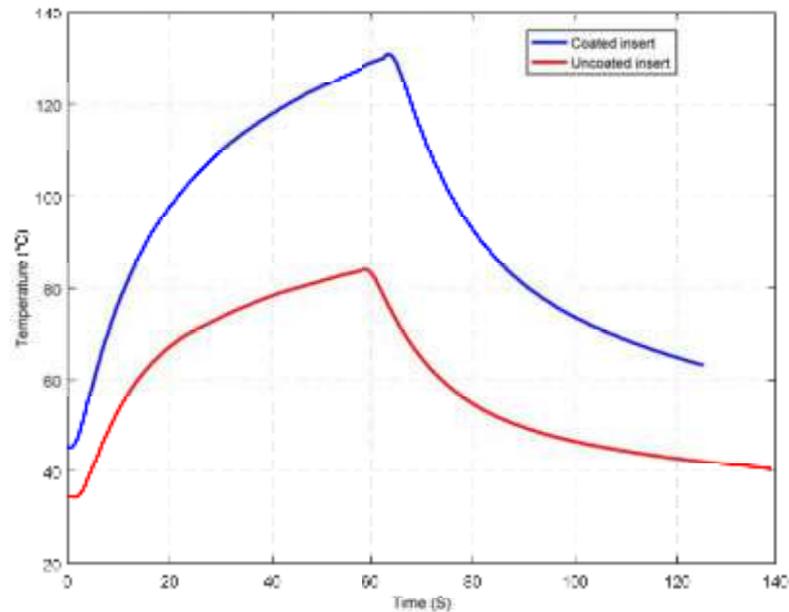


Figure III.4 Température en fonction du temps pour la catégorie 1, avec $f=0.225$ mm/tr, $a=0.25$ mm, et $N=900$ tr/min

Les figures III.1 à III.4 mettent en lumière l'impact significatif du revêtement de la plaquette sur la température de coupe lors du processus d'usinage de l'acier X200Cr12. Lorsque la plaquette est revêtue, on observe systématiquement une hausse de la température de coupe par rapport à celle observée avec une plaquette non revêtue. Cette observation est essentiellement attribuable à la disparité de conductivité thermique entre le matériau constituant le revêtement et le substrat de la plaquette.

Pour mieux comprendre ce phénomène, il convient d'examiner les mécanismes physiques et technologiques en jeu. Le revêtement appliqué sur la plaquette est conçu pour améliorer ses performances en termes de durabilité, de résistance à l'usure et de réduction des frottements lors du contact avec la pièce à usiner. Cependant, ce revêtement présente généralement une conductivité thermique différente de celle du substrat de la plaquette.

Lorsque la plaquette entre en contact avec la pièce à usiner et que la coupe débute, une partie de l'énergie générée par le processus d'usinage est dissipée sous forme de chaleur. Cette chaleur est alors transférée à la plaquette, où elle est répartie à travers le substrat et le revêtement. Toutefois, en raison de la différence de conductivité thermique entre ces deux matériaux, une portion plus importante de la chaleur peut rester piégée dans le revêtement, entraînant ainsi une élévation notable de la température de coupe à la surface de l'outil.

Cette augmentation de la température de coupe peut avoir des répercussions importantes sur le processus d'usinage, notamment en influençant la durée de vie de l'outil, la qualité de la surface usinée et même les propriétés mécaniques du matériau usiné. Par conséquent,

comprendre et maîtriser les effets thermiques liés à l'utilisation de plaquettes revêtues est essentiel pour optimiser les performances et la rentabilité des opérations d'usinage.

La figure III.5, représentant la température de coupe en fonction de l'avance par tour et de la profondeur de passe à une vitesse de rotation de $N=440$ tours par minute, revêt une importance cruciale. Cette courbe 3D offre une visualisation détaillée des relations complexes entre ces deux paramètres clés dans le contexte de l'usinage. En examinant la figure III.5, on peut facilement identifier les zones de la surface d'usinage où la température de coupe atteint des niveaux spécifiques, fournissant des indications précieuses sur la distribution thermique au cours du processus d'usinage.

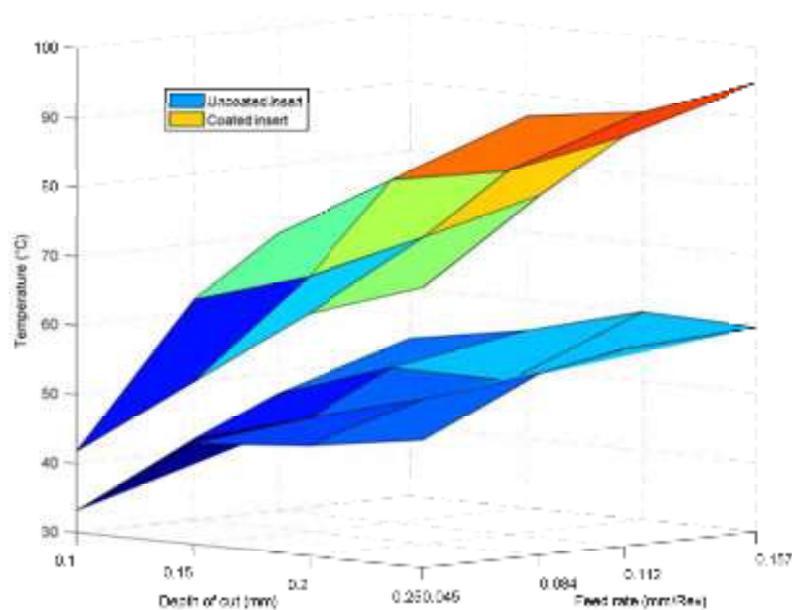


Figure III.5 Variation de la température de coupe pour une vitesse de rotation de $N=440$ tr/min

Les deux courbes représentant la température de coupe en fonction de l'avance par dent et de la profondeur de passe à une vitesse de rotation de $n=440$ tours par minute, tant pour la plaquette revêtue que pour la plaquette non revêtue, exhibent des similitudes marquantes dans leur forme générale. Cette similarité suggère que, malgré la présence du revêtement, les variations de température suivent des tendances parallèles. Toutefois, une distinction notable réside dans les valeurs plus élevées observées sur la courbe correspondant à la plaquette revêtue.

Les variations de température résultent de la dissipation de chaleur générée lors du processus d'usinage, un phénomène complexe influencé par de multiples facteurs, notamment la conductivité thermique des matériaux en contact et les caractéristiques de la coupe. Malgré la présence d'un revêtement sur la plaquette, qui est généralement conçu pour améliorer la

durabilité et la résistance à l'usure, une partie de la chaleur générée pendant l'usinage est absorbée par le revêtement.

III.4 Influence de l'avance par tour et de la vitesse de rotation

L'étude de l'influence de l'avance par tour et de la vitesse de rotation sur les valeurs de température au point de coupe lors d'usinage revêt une importance capitale pour maximiser l'efficacité des processus de fabrication. Une compréhension approfondie de ces paramètres permet d'optimiser les performances des machines-outils et d'atteindre les objectifs de production de manière rentable.

L'avance par tour est un paramètre fondamental qui détermine la quantité de matériau enlevée à chaque passage de l'outil de coupe.

L'interaction entre l'avance et la vitesse de rotation est complexe et dépendante de nombreux facteurs, tels que le matériau de la pièce, la géométrie de l'outil, la puissance de la machine-outil et les exigences de la pièce finie. Un équilibre approprié entre ces paramètres est nécessaire pour obtenir des performances optimales en termes de productivité,

Une vitesse de rotation incorrecte peut entraîner une surchauffe de l'outil, une usure prématurée, des vibrations excessives, voire des défaillances de la pièce usinée. Par conséquent, il est essentiel de choisir la vitesse de rotation appropriée pour obtenir les résultats d'usinage souhaités tout en assurant la sécurité et l'efficacité du processus.

Les résultats obtenus lors des essais de mesure de température sont présentés dans les figures ci-dessous. L'influence de l'avance par tour et de la profondeur de coupe lors de l'usinage de l'acier X200Cr12 est présentée dans les figures ci-dessous.

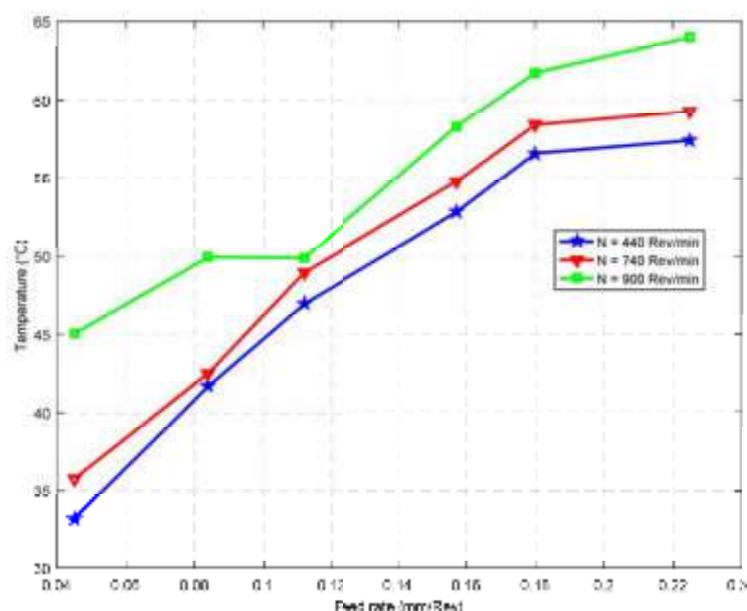


Figure III.6 Variation de la température de coupe en fonction de l'avance par dent pour $a = 0.1 \text{ mm}$

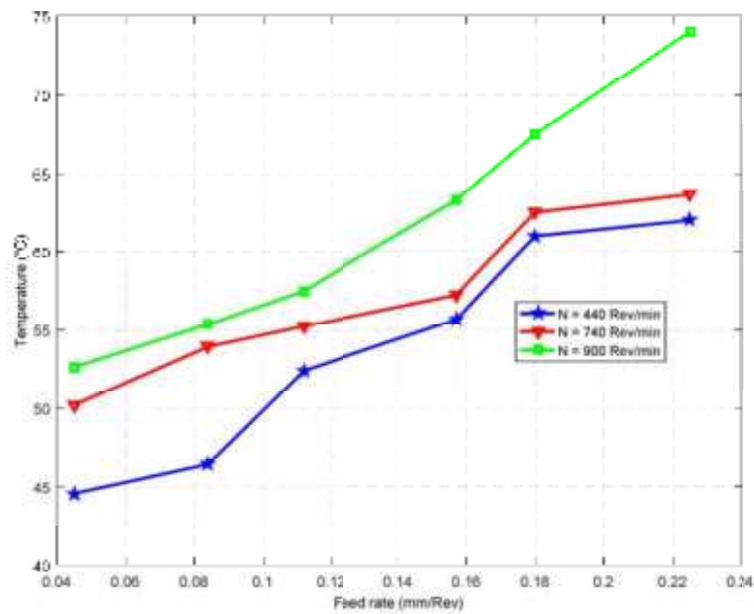


Figure III.7 Variation de la température de coupe en fonction de l'avance par dent pour $a = 0.15 \text{ mm}$

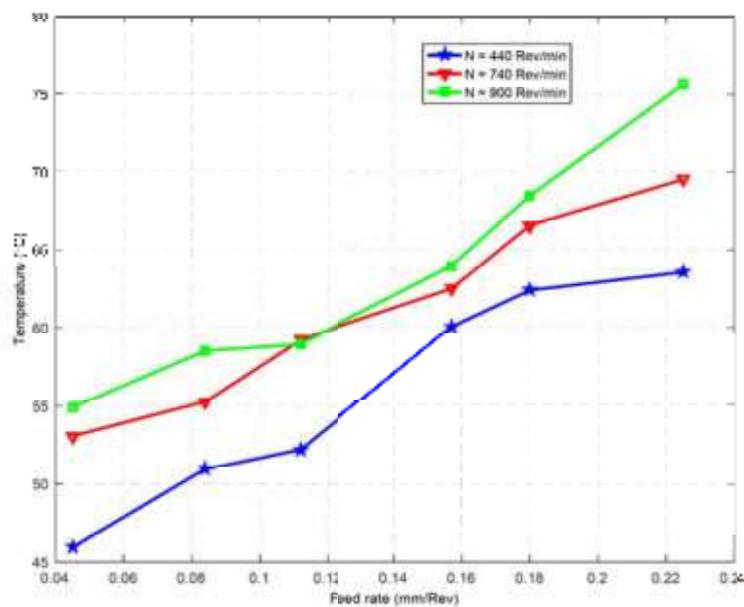


Figure III.8 Variation de la température de coupe en fonction de l'avance par dent pour $a = 0.20 \text{ mm}$

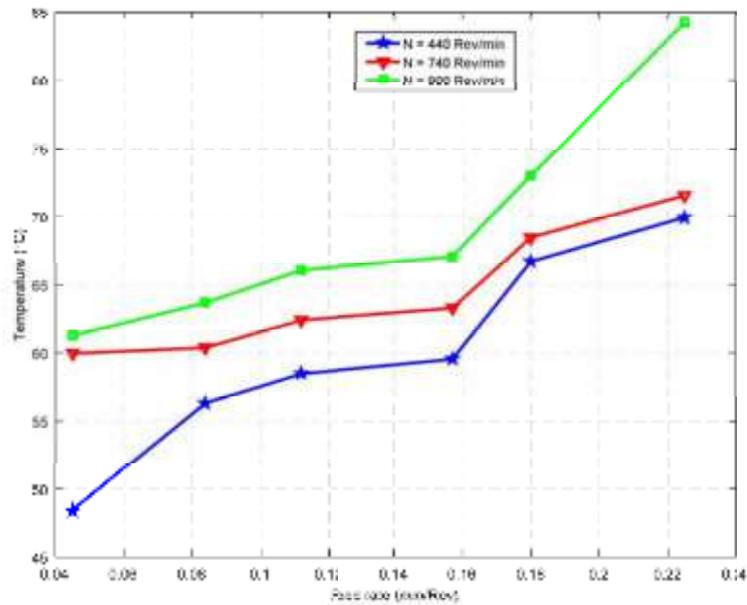


Figure III.9 Variation de la température de coupe en fonction de l'avance par dent pour $a = 0,25 \text{ mm}$

L'influence de l'avance par tour sur la température de coupe lors du processus de tournage du matériau X200Cr12 est clairement mise en évidence. Comme indiqué de manière éloquent dans les figures (III.6 à III.9), il est observé que toute augmentation de l'avance par tour entraîne une corrélation directe avec une hausse de la température de coupe. Ce phénomène découle de l'augmentation du frottement entre le copeau et l'outil de coupe, provoquant ainsi une amplification de l'énergie intrinsèque au système, et donc une élévation de la température de coupe. Cette tendance demeure constante tout au long du processus d'usinage de l'acier X200Cr12, indépendamment des variations de la vitesse de rotation appliquées.

De même, l'impact de la vitesse de rotation sur la température de coupe lors de l'usinage du matériau X200Cr12 est étudié à travers les mêmes figures (III.6 à III.9). On remarque que toute augmentation de la vitesse de rotation conduit à une augmentation proportionnelle de la température de coupe. Ce résultat découle du fait qu'une augmentation de la vitesse de rotation engendre une augmentation des forces de coupe, nécessitant ainsi une quantité accrue d'énergie pour éliminer le matériau, ce qui contribue à l'élévation de la température de coupe. Cette tendance demeure cohérente tout au long du processus d'usinage de l'acier X200Cr12, indépendamment des variations de la profondeur de coupe appliquées.

Ces observations soulignent l'importance critique de l'avance et de la vitesse de rotation dans la gestion thermique du processus d'usinage. Comprendre ces interactions est essentiel pour optimiser les paramètres de coupe et garantir des performances d'usinage efficaces et

cohérentes, tout en minimisant les effets indésirables tels que l'usure de l'outil et les dégradations de la qualité de la pièce usinée

III.5 Influence de la profondeur de passe et de la vitesse de rotation

Lorsque la profondeur de passe et l'avance par tour sont des facteurs intimement liés et ont un impact significatif sur la performance de l'usinage, nous avons réalisé des essais d'usinage sur une pièce en acier X200Cr12 afin d'explorer l'augmentation de température lors du tournage. Cependant, des valeurs excessives de ces paramètres peuvent entraîner un échauffement excessif, ce qui peut avoir de mauvaises conséquences telles que la déformation de la pièce, l'usure prématurée de l'outil et même des altérations des propriétés mécaniques du matériau usiné.

Ainsi, pour garantir des conditions d'usinage optimales et minimiser l'augmentation de température, il est important de sélectionner avec soin les valeurs appropriées de la profondeur de coupe et de l'avance par tour.

L'influence de la profondeur de passe sur la température de coupe lors du tournage de l'acier X200Cr12 est illustrée dans les figures (III.10 à III.12).

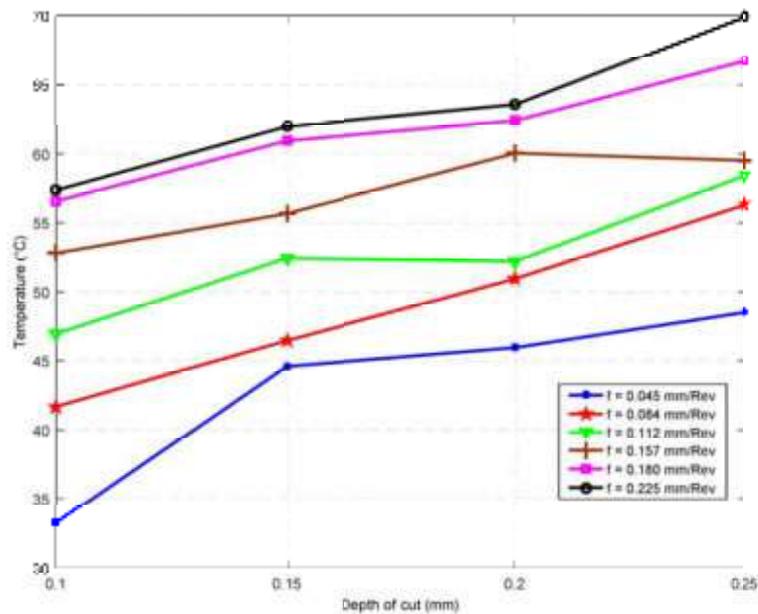


Figure III.10 Variation de la température de coupe en fonction de la profondeur de passe pour $N = 440$ tr/min

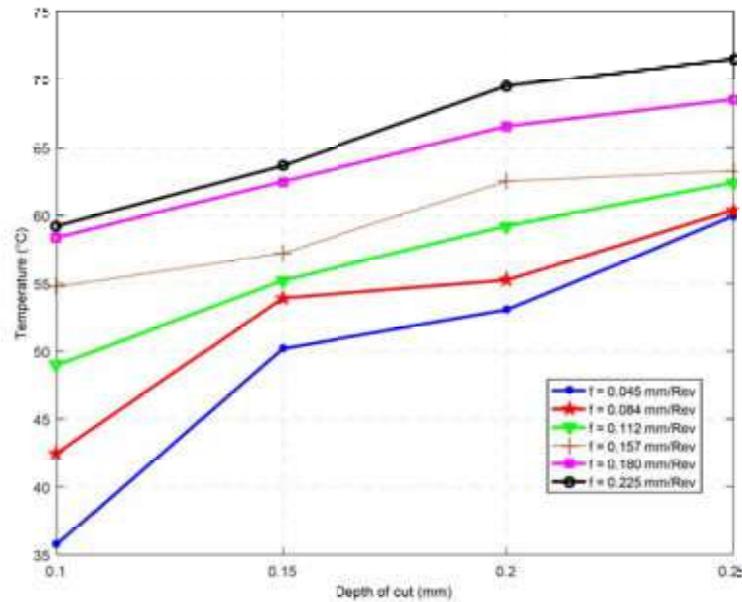


Figure III.11 Variation de la température de coupe en fonction de la profondeur de passe pour $N = 740$ tr/min

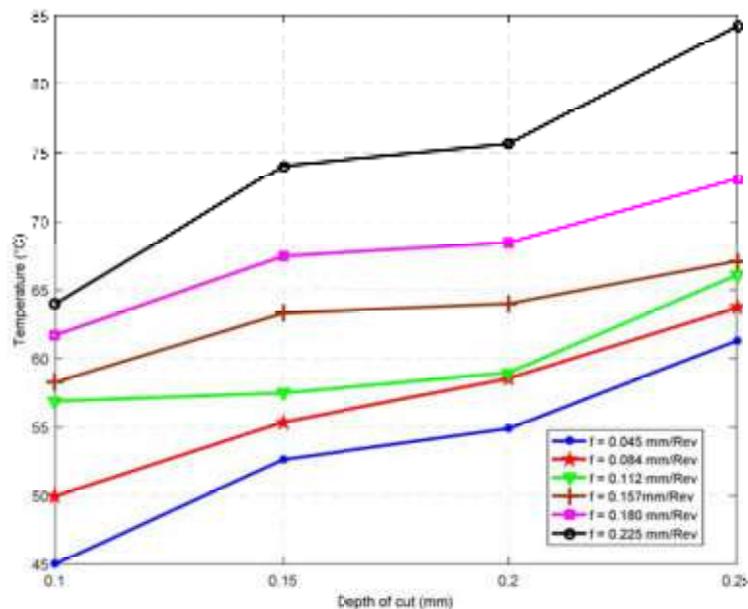


Figure III.12 Variation de la température de coupe en fonction de la profondeur de passe pour $N = 900$ tr/min

Les figures III.10 à III.12 offrent un aperçu détaillé de l'effet de la profondeur de passe sur la température de coupe lors du processus d'usinage de l'acier X200Cr12. Comme il est clairement observé, une augmentation de la profondeur de coupe entraîne une augmentation correspondante de la température de coupe.

Lorsque le matériau de la pièce usinée subit une déformation plastique, une grande partie de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur. Cela est dû au fait que les grandes déformations subies par la pièce résultent principalement de déformations plastiques, tandis

que les déformations élastiques ne représentent qu'une fraction négligeable de la déformation totale. Par conséquent, en augmentant la profondeur de coupe, on exerce une compression accrue au niveau de l'interface entre l'outil et la pièce, augmentant ainsi l'énergie transférée au système lors de la découpe du matériau.

Cette tendance demeure constante tout au long du processus d'usinage de l'acier, indépendamment des variations de l'avance par révolution. En comprenant ce phénomène, les opérateurs peuvent ajuster judicieusement la profondeur de coupe pour optimiser les performances d'usinage tout en maintenant des conditions thermiques stables. Cette connaissance permet non seulement de minimiser les dommages à l'outil et les défauts de la pièce, mais aussi d'améliorer l'efficacité globale du processus d'usinage.

III.6 Aspect physique des copeaux

Lors des processus de tournage, les copeaux se forment lorsque l'outil de coupe entre en contact avec la pièce en rotation, représentant les résidus de matériau évacués lors de cette opération essentielle. L'observation de ces copeaux revêt une importance cruciale dans le domaine de l'usinage et de la fabrication mécanique, offrant des indications précieuses sur le processus de coupe en cours et la qualité de l'usinage réalisé.

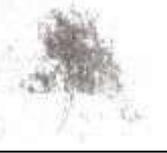
Analyser attentivement les caractéristiques physiques des copeaux peut fournir des indications précieuses pour ajuster les paramètres de coupe, optimiser les processus d'usinage, prévenir les défaillances de l'outil et améliorer la qualité des pièces usinées. Par exemple, la couleur des copeaux peut révéler des informations importantes sur le matériau usiné et les conditions de coupe. Des copeaux de couleur bleue, par exemple, pourraient indiquer une surchauffe due à une vitesse de coupe excessive ou à un manque de lubrification.

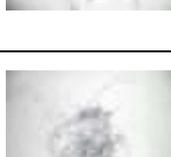
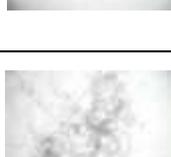
Les différentes morphologies des copeaux sont influencées par une multitude de facteurs, notamment la vitesse de coupe, la profondeur de coupe, les matériaux de la pièce et de l'outil, ainsi que les caractéristiques de conception de l'outil de coupe, tels que les angles de coupe. Les matériaux réagissent différemment aux forces de coupe, ce qui se traduit par une variété de formes de copeaux. Par conséquent, même des nuances subtiles dans la conception de l'outil de coupe peuvent conduire à des différences significatives dans la forme des copeaux produits.

En outre, les copeaux générés lors des opérations d'usinage peuvent être classés en diverses catégories en fonction de leur forme, de leur taille et de leur apparence. Cette classification permet une évaluation systématique de la performance de l'outil et des conditions de coupe, aidant ainsi à affiner les processus d'usinage pour obtenir des résultats

optimaux. Dans le cadre des opérations de tournage, les différentes morphologies des copeaux générées lors de l'utilisation de plaquettes revêtues sont présentées et analysées dans le Tableau 5. Ces observations sont appuyées par des photographies prises à l'échelle réelle à l'aide d'un appareil photo numérique Samsung M11, offrant une représentation visuelle précise des résultats obtenus.

Tableau III.2 Copeaux obtenus avec la plaquette revêtue.

a (mm)	f (mm/tr)	N= 440 (tr/min)	N= 740 (tr/min)	N= 900 (tr/min)	N= 1230 (tr/min)	N= 1500 (tr/min)
0.1	0.045					
	0.084					
	0.112					
	0.157					
	0.18					

	0.225					
0.15	0.045					
	0.084					
a (mm)	f (mm/tr)	$N= 440$ (tr/min)	$N= 740$ (tr/min)	$N= 900$ (tr/min)	$N= 1230$ (tr/min)	$N= 1500$ (tr/min)
0.15	0.112					
	0.157					
	0.18					
	0.225					

0.2	0.045						
	0.084						
	0.112						
	0.157						
	0.18						
	0.225						
<i>a</i> (mm)	<i>f</i> (mm/tr)	N= 440 (<i>tr/min</i>)	N= 740 (<i>tr/min</i>)	N= 900 (<i>tr/min</i>)	N= 1230 (<i>tr/min</i>)	N= 1500 (<i>tr/min</i>)	
0.25	0.045						
	0.084						
	0.112						
	0.157						

0.18					
0.225					

L'examen approfondi des figures précédentes dans le tableau III.2 nous a permis de classer les morphologies des copeaux en trois catégories distinctes, offrant ainsi une classification précieuse des résultats observés :

La première catégorie englobe principalement des copeaux de type grain. Ces derniers se forment lorsque l'on utilise une profondeur de passe importante, une avance élevée et une vitesse de rotation relativement faible. Cette combinaison de paramètres favorise la génération de copeaux de type grain, caractérisés par leur apparence fragmentée et leur formation à partir de matériaux découpés en petits morceaux. Ce type de copeaux est souvent associé à des conditions de coupe agressives, où une quantité substantielle de matériau est retirée en une seule passe.

La deuxième catégorie se compose principalement de copeaux continus fragmentés. Ce type de copeaux se forme lorsque l'on privilégie une profondeur de coupe maximale, une avance maximale et une vitesse de rotation moyenne à élevée. Dans ces conditions, les copeaux se forment de manière continue mais sont fragmentés à intervalles réguliers. Cette fragmentation peut résulter d'une combinaison de forces de coupe importantes et d'une action de cisaillement du matériau lors de l'usinage. Les copeaux continus fragmentés sont souvent observés dans des scénarios où une grande quantité de matériau est enlevée, mais où la vitesse de rotation plus élevée permet de maintenir la stabilité du processus d'usinage.

Enfin, la troisième catégorie est principalement composée de copeaux continus. Ce type de copeaux se forme généralement lorsque les conditions de coupe sont réduites, avec de faibles valeurs de profondeur de coupe, d'avance et de vitesse de rotation. Les copeaux continus se caractérisent par leur formation ininterrompue et régulière, témoignant d'un processus d'usinage plus contrôlé et précis. Cette morphologie de copeaux est souvent recherchée dans des applications nécessitant une finition de surface de haute qualité ou une réduction minimale de la matière.

Cette classification des copeaux en fonction des paramètres de coupe offre des insights précieux pour comprendre et optimiser les processus d'usinage. En identifiant les tendances associées à chaque catégorie de copeaux, les opérateurs peuvent ajuster de manière proactive les paramètres de coupe pour répondre aux exigences spécifiques de chaque application, garantissant ainsi des performances d'usinage optimales et une qualité de pièce supérieure.

III.7 Conclusion

Ce chapitre démontre une méthodologie efficace pour évaluer l'impact des paramètres de coupe sur la température de coupe lors du processus de tournage de matériaux durs. Une contribution majeure de ce chapitre réside dans la proposition d'une large gamme de valeurs pour les paramètres de coupe, à la fois pour les plaquettes revêtues et non revêtues, dans le contexte spécifique du tournage de l'acier X200Cr12.

La méthodologie expérimentale présentée comprend une série d'essais conçus pour évaluer l'effet des conditions de coupe sur l'évolution de la température à l'intérieur de la plaquette de coupe. Les résultats obtenus indiquent clairement que la température de coupe dans l'outil augmente proportionnellement à l'augmentation des paramètres de coupe. De plus, ces résultats révèlent une corrélation entre la température de coupe et la conductivité thermique du matériau de la plaquette, soulignant ainsi l'importance de ce facteur dans la dissipation de chaleur pendant le processus d'usinage.

Les résultats de cette étude sont en accord avec les recherches antérieures menées par d'autres chercheurs, renforçant ainsi la validité des résultats obtenus. En consolidant et en étendant les connaissances existantes dans le domaine, cette recherche offre des perspectives précieuses pour la sélection et l'optimisation des paramètres de coupe afin d'améliorer les performances et la durabilité des outils de coupe, ainsi que la qualité des pièces usinées dans le contexte spécifique du tournage de l'acier X200Cr12.

Chapitre IV

***MODELISATION NUMERIQUE DE
LA TEMPERATURE DE COUPE***

IV.1 Introduction

L'optimisation des processus de fabrication dans l'industrie repose souvent sur l'utilisation de modèles numériques pour étudier l'efficacité et la qualité des opérations d'usinage. Dans ce contexte, la modélisation de la température des outils de coupe lors de l'usinage offre une approche précieuse. Le modèle de coupe orthogonale est largement employé pour simuler le processus d'usinage, permettant d'analyser les interactions complexes entre l'outil de coupe en carbure et la pièce travaillée, comme l'acier X200Cr12. Cela englobe la génération de chaleur, les contraintes thermiques et mécaniques, ainsi que les déformations de l'outil et de la pièce.

Dans ce chapitre, nous adoptons une approche numérique en utilisant le logiciel ABAQUS, une plateforme de simulation par éléments finis avancée. Cette plateforme offre une puissante capacité pour modéliser, simuler et analyser le comportement des structures et des matériaux. Nous utilisons ABAQUS pour résoudre les équations mathématiques qui prédisent le comportement des matériaux dans des conditions réelles, en modélisant les interactions et en prédisant la distribution de la température dans les outils de coupe.

L'exactitude du modèle géométrique de la pièce et de l'outil est cruciale pour une simulation réaliste. En intégrant les caractéristiques de la pièce en acier X200Cr12 ainsi que de l'outil de coupe en carbure, nous définissons correctement les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux pour obtenir des résultats précis. De plus, nous intégrons les conditions aux limites telles que la vitesse de coupe et la température ambiante dans le modèle afin de refléter les conditions réelles d'usinage.

IV.2 Modèle de coupe orthogonale pour la simulation de l'usinage de l'acier X200Cr12

Dans le domaine de l'usinage, la coupe orthogonale est une technique fondamentale où l'outil de coupe entre en contact avec la pièce à usiner perpendiculairement à sa surface. Cette méthode de coupe est largement utilisée dans divers processus d'usinage pour façonner les matériaux selon des formes spécifiques. Pour mieux comprendre et optimiser ces processus, la création de modèles numériques représentant le processus d'usinage est cruciale. Ces modèles prennent en compte une multitude de paramètres, tels que les paramètres d'usinage, les matériaux utilisés, les géométries des pièces et les conditions environnementales.

Dans le cadre de cette étude, nous nous concentrons sur le développement et l'application d'un modèle de coupe bidimensionnel pour simuler le processus de coupe orthogonale de l'acier X200Cr12, en utilisant le logiciel Abaqus 6.14-5. Abaqus est un logiciel de simulation par éléments finis largement utilisé dans l'industrie pour modéliser et simuler

différents comportements, y compris les processus de fabrication tels que l'usinage. Cette approche permet d'analyser les aspects critiques de la coupe, notamment la génération de chaleur et les déformations de l'outil et de la pièce.

L'utilisation de techniques de simulation numérique offre plusieurs avantages significatifs. En effet, elle permet d'analyser en détail les déformations et les températures générées pendant l'usinage, ce qui est essentiel pour évaluer les performances de l'outil et prévenir les défaillances prématurées. De plus, cette approche offre la possibilité d'explorer différentes configurations d'outils et de paramètres d'usinage pour optimiser les processus et améliorer la qualité des pièces produites. En combinant la modélisation numérique avec des techniques expérimentales, il est possible d'obtenir une compréhension approfondie du processus d'usinage et de développer des stratégies d'optimisation plus efficaces pour l'industrie manufacturière.

IV.3 Modèle géométrique

Dans cette section, un modèle éléments finis ALE en 2D a été développé en utilisant le logiciel ABAQUS/CAE V6.14-5 afin de simuler les processus de tournage de l'acier X200Cr dans des conditions de température ambiante. L'objectif principal était de mesurer les températures résultantes à la suite de ces opérations d'usinage.

Le processus de tournage est intrinsèquement tridimensionnel. Pourtant, dans le cadre de cette simulation, une conversion du modèle 3D au 2D était nécessaire. Pour ce faire, il est crucial de définir une projection appropriée. Cette projection est réalisée en considérant un petit segment de la pièce usinée. Du fait de sa petitesse, ce segment peut être approximé comme étant linéaire. Dans les opérations d'usinage, deux arêtes de coupe sont impliquées : les arêtes de coupe principales et secondaires. Cependant, dans notre simulation en 2D, seule l'une de ces arêtes est prise en compte (voir Figure IV.1). Selon cette projection, la distance entre la pointe de l'outil et le bord supérieur de la pièce à usiner, présentée dans la figure IV.1, correspond à la vitesse d'avance issue des données de mesure, et non à la profondeur de coupe.

La mise en place d'un modèle 2D pour simuler un processus tridimensionnel implique des compromis et des approximations, mais elle offre néanmoins des résultats significatifs qui peuvent être utilisés pour comprendre et optimiser les processus de tournage. En utilisant cette approche, nous avons pu obtenir des données précieuses sur les températures générées pendant le tournage de l'acier X200Cr, ce qui contribue à une meilleure compréhension des phénomènes thermiques impliqués dans les opérations d'usinage.

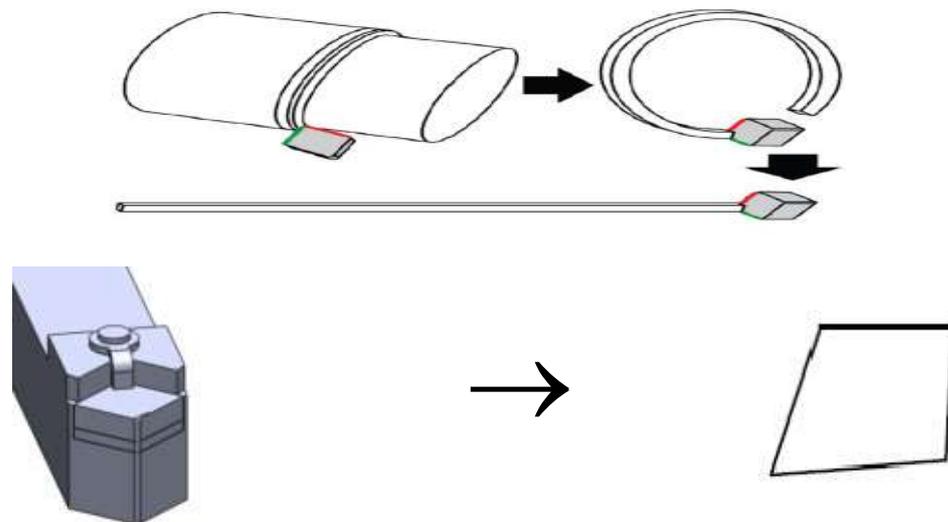


Figure VI.1 Illustration de la projection 3D-2D.

La figure IV.2 présente la géométrie de base du modèle éléments finis (EF) utilisé, accompagnée des conditions aux limites appliquées, afin de refléter précisément les conditions d'usinage. Dans ce schéma, la coupe est effectuée dans le plan XY sous condition de déformation plane, ce qui permet de simplifier l'analyse tout en conservant les principaux aspects du processus.

Dans le cadre des simulations, la pièce à usiner est subdivisée en trois couches distinctes. La première couche, située en haut, représente la couche de copeaux (S1), où se déroule l'action de coupe principale. Cette couche est séparée du reste de la pièce (S3) par une couche intermédiaire d'éléments sacrificiels (S2), placée en fonction de la projection 3D-2D précédemment décrite (f). Cette configuration permet de modéliser avec précision les phénomènes de coupe et d'évacuation des copeaux, en tenant compte de la déformation du matériau et de la génération de chaleur.

Un aspect crucial de cette approche est la gestion des éléments sacrificiels. Lorsque l'outil de coupe approche l'un de ces éléments, une suppression sélective est appliquée en fonction d'un critère de dommage prédéfini. Cette méthode permet de simuler de manière réaliste l'interaction entre l'outil et la pièce, en prenant en compte les effets de l'usure et de l'abrasion sur les éléments sacrificiels et en assurant la stabilité et la précision de la simulation.

La figure IV.2 offre un aperçu détaillé de la configuration du modèle EF, en mettant en évidence la segmentation de la pièce et le rôle crucial des éléments sacrificiels dans la

simulation du processus d'usinage. Cette approche permet une représentation fidèle des conditions réelles d'usinage, facilitant ainsi l'analyse et l'optimisation des opérations de coupe.

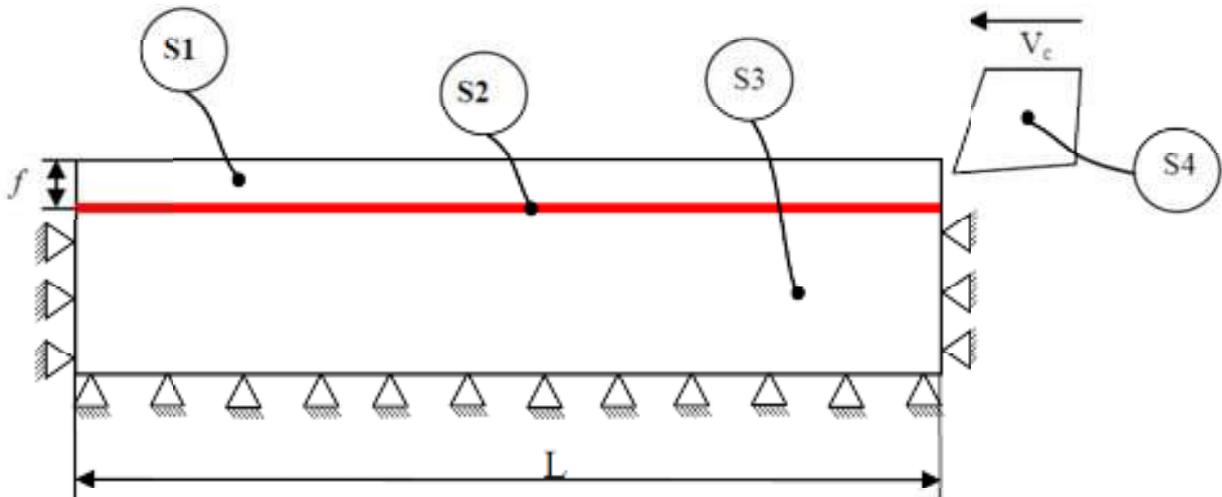


Figure VI.2 Modèle EF pour la simulation 2D

L'arrête de coupe de l'outil a été délibérément positionnée sur la couche sacrificielle de la géométrie de la pièce, assurant ainsi un contact adéquat et un comportement réaliste lors de la simulation du processus d'usinage. Cette disposition stratégique permet de mieux appréhender les interactions entre l'outil et la pièce, en tenant compte des contraintes et des forces appliquées pendant la coupe.

En ce qui concerne les conditions aux limites, plusieurs paramètres ont été spécifiés pour garantir la représentation fidèle des conditions réelles. Une condition de bord encastree a été appliquée au bord inférieur de la pièce, assurant ainsi sa stabilité et son immobilisation pendant le processus d'usinage. De plus, des conditions de bord similaires ont été définies pour les bords gauche et droit de la troisième section (S3) de la pièce, garantissant ainsi une fixation adéquate et empêchant tout mouvement indésirable.

Quant à l'outil lui-même, des conditions de bord spécifiques ont été appliquées pour refléter son comportement pendant la simulation. Les bords supérieur et droit de l'outil dans la direction y sont maintenus fixes, assurant ainsi sa position stable et son orientation correcte par rapport à la pièce. En revanche, une condition de bord de type déplacement a été définie le long de la direction x , correspondant à la longueur totale de la pièce (L). Cette condition permet de simuler le déplacement contrôlé de l'outil le long de l'axe x , de droite à gauche, à une vitesse de coupe déterminée.

Il est important de noter que dans cette configuration, le mouvement de la pièce elle-même est complètement restreint par son plan inférieur, garantissant ainsi une représentation précise des contraintes appliquées pendant l'usinage. Cette approche permet une simulation

réaliste du processus de coupe, offrant ainsi des résultats fiables et significatifs pour l'analyse et l'optimisation des opérations d'usinage.

IV.3.1 Modélisation de la pièce

Pour les simulations, une pièce aux dimensions spécifiques a été générée, mesurant 1,8 mm de longueur et 0,3 mm de largeur. Cette taille correspond à une échelle appropriée pour représenter de manière réaliste les conditions d'usinage attendues. Afin de garantir la cohérence avec les conditions de la réalité, des contraintes mécaniques ont été appliquées sur la surface inférieure de la pièce ainsi que sur ses deux côtés. Ces contraintes ont été soigneusement conçues pour restreindre le mouvement de la pièce dans toutes les directions, assurant ainsi une représentation précise des forces et des contraintes subies lors du processus d'usinage. La figure IV.3 illustre cette configuration, mettant en évidence la manière dont les contraintes sont appliquées pour stabiliser la pièce et empêcher tout déplacement indésirable pendant la simulation. Cette approche permet de reproduire fidèlement les conditions de coupe réelles, offrant ainsi des résultats de simulation précis et pertinents pour l'analyse et l'optimisation des opérations d'usinage.



Figure VI.3 Conditions aux limites

Un ensemble de propriétés spécifiques a été assigné à la pièce en acier X200Cr12 afin de garantir une représentation réaliste de son comportement lors du processus de simulation. Ces propriétés ont été soigneusement sélectionnées pour refléter les caractéristiques réelles de ce matériau et sont essentielles pour obtenir des résultats précis et significatifs.

Tableau IV.1. Paramètres thermomécaniques de l'acier X200Cr12

Propriétés	Pièce X200Cr
Densité (kg/m ³)	7700
Module d'Young E (GPa)	210
Coefficient de Poisson ν	0.27
Conductivité thermique λ (W/m °C)	20
Chaleur spécifique Cp (J.kg-1. °C ⁻¹)	470

La pièce impliquée dans ce modèle était fabriquée à partir d'acier X200Cr12. Afin de capturer de manière précise et détaillée le comportement de cette pièce sous des charges et des conditions de température variables, le modèle de déformation plastique Johnson-Cook a été choisi comme base de modélisation. Ce choix s'avère pertinent en raison des capacités reconnues de ce modèle à caractériser le comportement des métaux soumis à des conditions de déformation importantes, de déformations de température significatives et de taux de déformation élevés.

Le modèle constitutif de Johnson-Cook, une forme spécifique de durcissement isotrope, offre une représentation mathématique sophistiquée de la réponse du matériau aux contraintes externes. Il est largement utilisé dans le domaine de la simulation des processus de fabrication et de l'usinage en raison de sa capacité à reproduire de manière réaliste les phénomènes observés dans ces contextes.

La contrainte à la limite d'élasticité (σ) est un paramètre clé du modèle Johnson-Cook. Ce paramètre définit la contrainte à laquelle le matériau commence à se déformer de manière permanente sous l'effet de la charge appliquée. En d'autres termes, il représente la limite au-delà de laquelle le matériau subit une déformation irréversible. La valeur de cette contrainte est déterminée par divers facteurs, y compris la composition chimique du matériau, sa structure cristalline et son traitement thermique.

En utilisant le modèle de déformation plastique Johnson-Cook, il devient possible de prédire avec précision le comportement de la pièce en acier X200Cr12 sous différentes conditions de charge et de température. Cette approche permet une modélisation détaillée et réaliste du processus d'usinage, ce qui est essentiel pour une analyse approfondie et une optimisation efficace des opérations de fabrication.

$$\sigma = \left[(A + B(\epsilon^{pl})^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\epsilon^{pl}}{\epsilon_0} \right) \right) \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\epsilon^{pl}}{\epsilon_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (\text{IV.1})$$

Où A représente la limite d'élasticité, B est le paramètre d'écrouissage, C est le paramètre de constante de vitesse de déformation, n est le coefficient d'écrouissage, m est le coefficient de dépendance à la température, T, T_m et T_r représentent respectivement les températures actuelle, de fusion et ambiante. Ces paramètres doivent être mesurés à ou en dessous de la température de transition. Les valeurs de ces paramètres pour l'acier X200Cr12 étudié peuvent être trouvées dans le Tableau IV.2.

La défaillance selon Johnson-Cook est basée sur la défaillance de la déformation équivalente. Celle-ci se produit lorsque le paramètre de dommage dépasse 1. Le paramètre de dommage (W) est défini comme suit :

$$W = \Sigma \left(\frac{\Delta \varepsilon^{pl}}{\varepsilon_f^{pl}} \right) \quad (IV.2)$$

Où $\Delta \varepsilon^{pl}$ augmente en fonction de la déformation équivalente, ε_f^{pl} La contrainte de rupture est la déformation à la rupture, La relation entre contrainte-déformation du matériau endommagé est illustrée dans la figure IV.4. La perturbation du maillage de l'élément est nécessaire pour modéliser la formation de copeaux. Il s'agit d'un modèle de rupture pour les matériaux ductiles et comprend deux phases : une phase d'initiation des dommages et une phase d'évaluation des dommages. Pour ce modèle de dommage Johnson-Cook, la déformation équivalente à la rupture est :

$$\varepsilon_f = [(D_1 + D_2 \exp(D_3 \frac{p}{\sigma})) (1 + D_4 \ln(\frac{\varepsilon^{pl}}{\varepsilon_0}))] [1 + D_5 (\frac{T - T_r}{T_m - T_r})] \quad (IV.3)$$

Les constantes matériaux (D_1, D_2, D_3, D_4, D_5) de la loi d'endommagement de Johnson et Cook sont, comme pour la loi de comportement, identifiable à partir de tests expérimentaux et numériques. Le découplage des influences du taux de triaxialité, de la vitesse de déformation et de la température permet d'identifier chacune des constantes séparément par des tests spécifiques.

Tableau IV.2. Paramètres de la loi de comportement Johnson-Cook pour l'acier X200Cr12

Pièce	A (MPa)	B (MPa)	n	c	m
X200Cr12	1200	1200	50000	0	1

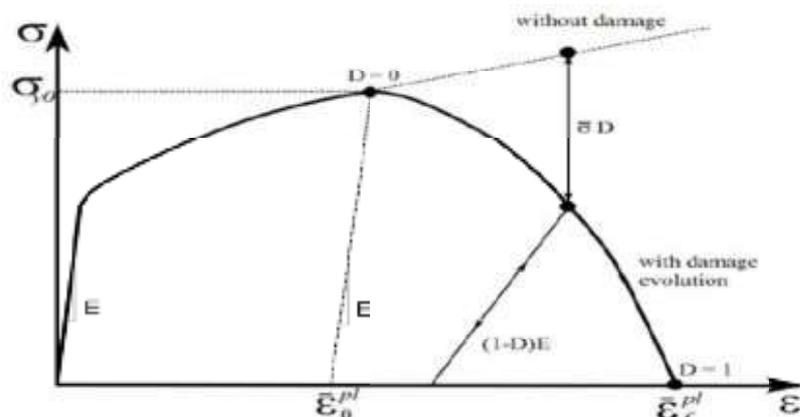


Figure VI.4 Courbe contrainte-déformation avec prise en compte de la dégradation due aux dommages

IV.3.2 Modélisation de l'outil de coupe

Dans ce travail, une modélisation détaillée de l'outil est réalisée à partir d'une plaquette d'outil numérisée en 2D. La Figure IV.5 présente les paramètres géométriques essentiels de l'outil, offrant ainsi un aperçu clair de sa configuration. L'angle d'attaque, crucial pour déterminer l'efficacité de la coupe, est fixé à 95° , tandis que l'angle de dépouille est maintenu à 0° pour faciliter le processus de coupe. De plus, le rayon d'arrondi du bord de coupe, mesurant $0,15 \mu\text{m}$, est spécifié pour améliorer la durabilité de l'outil et réduire les risques d'endommagement lors de l'usinage.

Outre les aspects géométriques, des considérations thermiques sont également prises en compte. La température initiale tant de l'outil que de la pièce est fixée à 20°C , fournissant ainsi une base de départ pour les simulations thermiques. Ces conditions thermiques initiales sont cruciales pour évaluer l'impact de la chaleur générée pendant le processus d'usinage sur les performances de l'outil et de la pièce.

En outre, le coefficient de frottement entre la pièce et l'outil est spécifié à $0,2$, ce qui influence directement les forces de friction engendrées pendant la coupe. Ce paramètre est crucial pour évaluer la résistance au glissement entre l'outil et la pièce, et il est soigneusement pris en compte dans la modélisation pour assurer des résultats de simulation précis et fiables.

Angle de dépouille: $\alpha=0^\circ$.
 Angle d'attaque : $\gamma=95^\circ$.
 Rayon d'acuité d'arête : $R=15\mu\text{m}$.

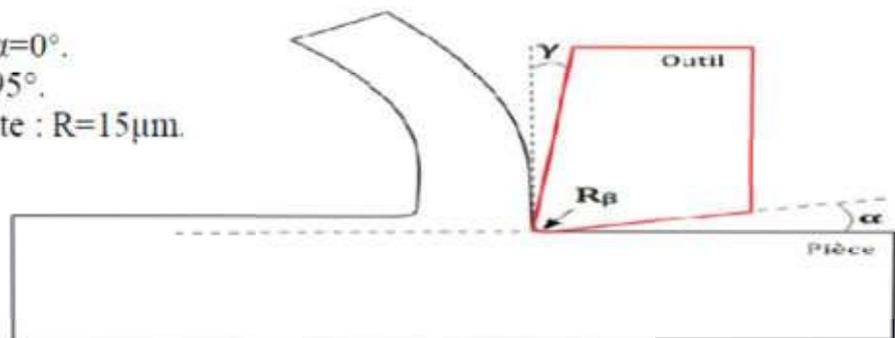


Figure VI.5 Géométrie 2D de l'outil de coupe

Le carbure est choisi comme matériau pour l'outil, offrant une résistance et une durabilité élevées indispensables pour les opérations d'usinage. Dans le cadre de la modélisation, l'outil est représenté comme un matériau élastique avec des propriétés spécifiques telles que la conductivité isotrope, la densité et le coefficient de Poisson. Ces caractéristiques sont fondamentales pour assurer une simulation précise de la formation des copeaux lors de l'interaction entre l'outil et la pièce.

L'étude des copeaux revêt une importance particulière dans la compréhension des processus d'usinage, car ils sont le produit de l'action de coupe et peuvent influencer considérablement la qualité de la surface usinée. Les copeaux, pouvant se déplacer librement

ou se briser en fonction de leurs propriétés physiques, sont étroitement liés aux contraintes, aux déformations et à la température générées pendant l'usinage. Ainsi, une représentation précise des propriétés thermomécaniques de l'outil est cruciale pour une modélisation adéquate de ce processus.

Le tableau IV.3 présente de manière détaillée les principaux éléments thermomécaniques de l'outil, fournissant ainsi un aperçu complet de ses caractéristiques essentielles. Ces données incluent des paramètres tels que la conductivité thermique, la capacité thermique spécifique, la densité et le coefficient de dilatation thermique. Ces propriétés permettent de quantifier la manière dont l'outil réagit aux charges thermiques et mécaniques pendant l'usinage, ce qui est crucial pour évaluer sa performance et sa durabilité dans des conditions réelles.

Tableau IV.3 Caractéristiques thermomécaniques de l'outil de coupe

Propriétés	Outil de coupe
Densité (kg/m³)	15700
Module d'Young E (GPa)	705
Coefficient de Poisson ν	0.23
Conductivité thermique λ (W/m °C)	24
Chaleur spécifique Cp (J.kg-1. °C -1)	178

La figure IV.6 présente le maillage appliqué dans le cadre de cette étude. Ce maillage a été conçu pour garantir une représentation précise et efficace de la géométrie de la pièce et de l'outil, ainsi que pour permettre une simulation précise des interactions entre ces éléments lors du processus d'usinage.

Le maillage était composé d'éléments CPE4RT avec une condition de déformation plane, assurant ainsi une représentation adéquate de la déformation dans le plan XY. Pour contrôler la distorsion du maillage et garantir sa stabilité, un contrôle de distorsion a été appliqué à chaque section, à l'exception de la section S1. Dans cette dernière, un remaillage ALE a été utilisé avec une fréquence de 50000 et 5 passes de remaillage par incrémentation. Cette approche a permis de prévenir une déformation excessive du maillage, tout en maintenant sa qualité et sa précision.

Il convient de noter que la suppression d'éléments n'était autorisée que dans la couche sacrificielle, ce qui a contribué à optimiser l'efficacité du maillage tout en préservant son intégrité structurelle. Cette stratégie a été essentielle pour garantir des résultats de simulation fiables et précis, tout en minimisant les temps de calcul.

Le contact entre l'outil et la pièce a été modélisé à l'aide d'une interaction surface-noeud, permettant ainsi de capturer efficacement les forces et les déformations résultant de cette

interaction. Cette approche de modélisation du contact a été soigneusement choisie pour assurer une représentation réaliste des conditions de coupe et des phénomènes associés.

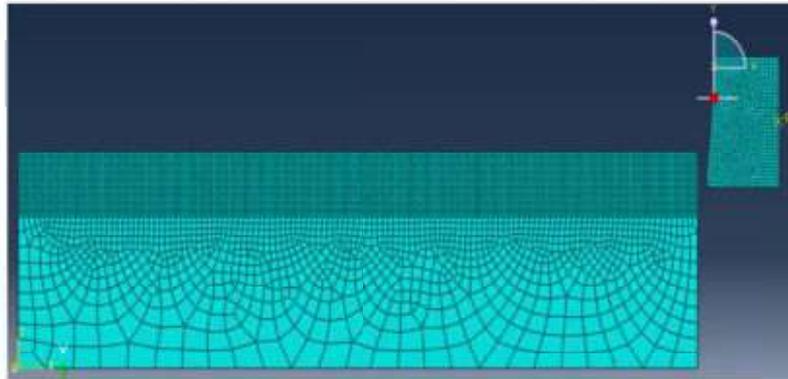


Figure IV.6 Illustration du Maillage

Des éléments de continuum quadrilatéraux thermiquement couplés CPE4RT, dotés d'une formulation de contrainte de plan, ont été employés pour garantir une représentation précise du comportement thermomécanique dans la simulation. Pour les zones désignées comme "copeau non coupé" et "séparation des copeaux", une taille de maillage de 30 μm a été sélectionnée, assurant ainsi une résolution appropriée des phénomènes à ces emplacements cruciaux.

En revanche, des densités de maillage plus élevées (avec une taille de maillage d'environ 30 μm) ont été générées spécifiquement aux sections critiques de l'"outil" et de la "pièce non usinée", là où les contacts et les interactions sont plus susceptibles de se produire au cours des simulations de coupe. Cette stratégie a pour but d'optimiser la précision des résultats dans les zones où les contraintes et les déformations sont plus prononcées.

Les simulations ont été menées à différentes vitesses de rotation, à savoir 440, 900 et 1500 tr/min, et avec différentes avances, soit 0.045, 0.084 et 0.157 mm/rev. Ces paramètres opérationnels ont été sélectionnés délibérément pour couvrir une plage significative de conditions de coupe, permettant ainsi une analyse complète des performances de l'outil et des réponses thermiques dans des scénarios variés.

IV.4 Résultats et Discussions

IV.4.1 Distribution de température

La répartition de la température le long de la zone de contact entre la pièce et l'outil revêt une importance capitale dans les processus d'usinage et de transformation des matériaux. Cette répartition thermique résulte d'une interaction complexe entre plusieurs paramètres, tels que la vitesse de coupe, la pression d'usinage, les propriétés thermiques des matériaux en jeu, ainsi que la géométrie de l'outil et de la pièce.

La zone de contact entre l'outil et la pièce est le point focal des échanges thermiques intenses, souvent accompagnés de phénomènes de frottement et de déformation plastique. Ces interactions thermomécaniques exercent une influence directe sur la qualité de l'usinage, la durée de vie de l'outil, ainsi que les propriétés finales de la pièce usinée.

Grâce à la simulation numérique, nous avons pu observer une variation significative de la répartition de la température le long de la zone de contact, avec des pics de chaleur localisés à des endroits spécifiques. Ces fluctuations thermiques peuvent entraîner des contraintes résiduelles, des déformations indésirables, voire des défauts de surface sur la pièce usinée.

Les paramètres d'usinage tels que l'avance et la vitesse de rotation jouent un rôle crucial dans la génération de chaleur. Les simulations démontrent que la température est principalement concentrée dans l'interface entre l'outil et la pièce. Ce phénomène s'explique par la production de chaleur accrue résultant du frottement entre la pièce et l'outil, ainsi que par les contraintes plastiques et le frottement à cette interface. En comprenant ces mécanismes thermiques, il devient possible de mettre au point des stratégies d'usinage plus efficaces et de minimiser les effets indésirables sur les composants usinés.

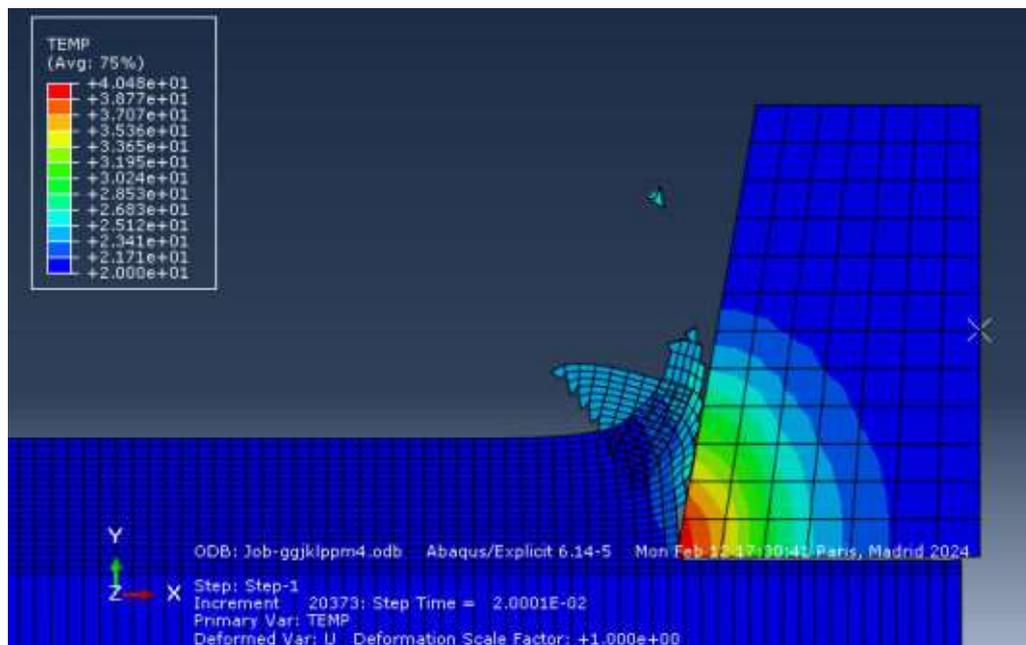


Figure IV.7 Répartition de la Température lors de l'Opération de Tournage.

IV.4.2 Effet de la vitesse de rotation et d'avance sur la température de coupe

L'analyse des effets de la vitesse de rotation et de l'avance par tour sur la température de la plaquette de coupe en carbure à l'aide d'ABAQUS revêt une importance cruciale dans le domaine de la simulation numérique dédiée à l'usinage.

Les deux graphiques ci-dessous illustrent la relation entre la température et l'avance par tour ainsi que la vitesse de rotation. Initialement, une vitesse de rotation de 900 tr/min a été définie, avec des ajustements d'avance à 0.045, 0.084 et 0.157 mm/tr, dans le but d'étudier l'évolution de la température au fil du temps. Il a été observé que l'élévation de la température au fil du temps est étroitement liée au contact entre la pièce et l'outil. De plus, l'augmentation de l'avance par tour entraîne une augmentation de la section du copeau et de la puissance de friction exercée sur la face de l'outil, ce qui induit une augmentation de la température dans la zone de coupe, ce qui est cohérent avec les attentes.

Par la suite, en maintenant l'avance à 0.045 mm/tr et en faisant varier la vitesse de rotation entre 440, 900 et 1500 tr/min, il est clair que l'augmentation de la vitesse de rotation entraîne une température de contact interfaciale plus élevée. Ce comportement peut être attribué à l'augmentation de la force de friction et du taux de déformation primaire et secondaire avec l'augmentation de la vitesse de rotation, ce qui provoque une augmentation de la température dans la zone de coupe.

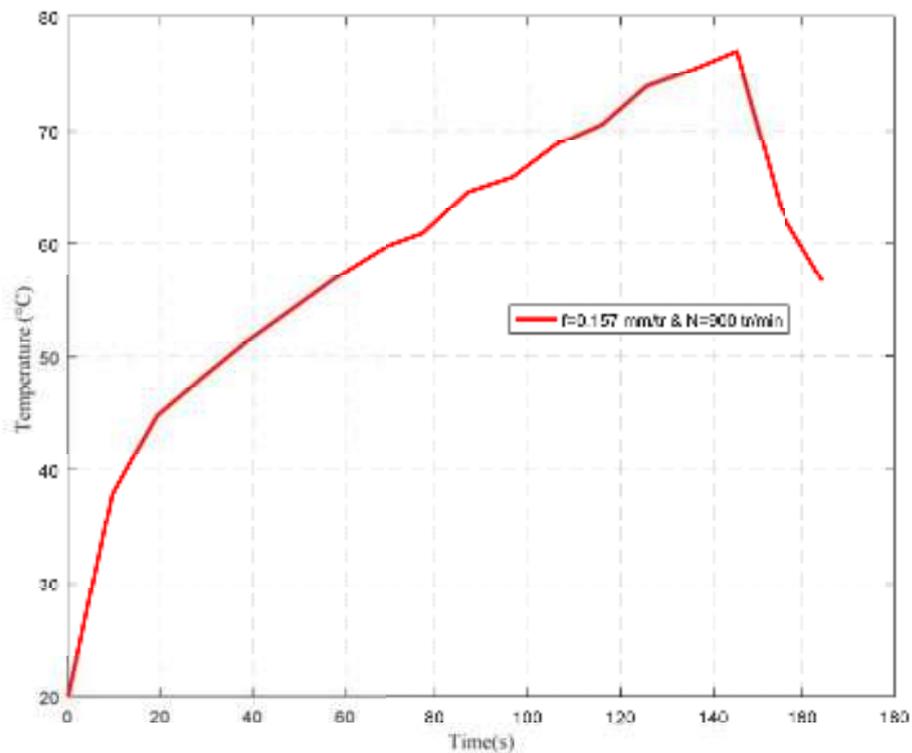


Figure IV.8 Température simulée en fonction du temps, avec $f=0.157$ mm/tr, $a=0.15$ mm, et $N=900$ tr/min

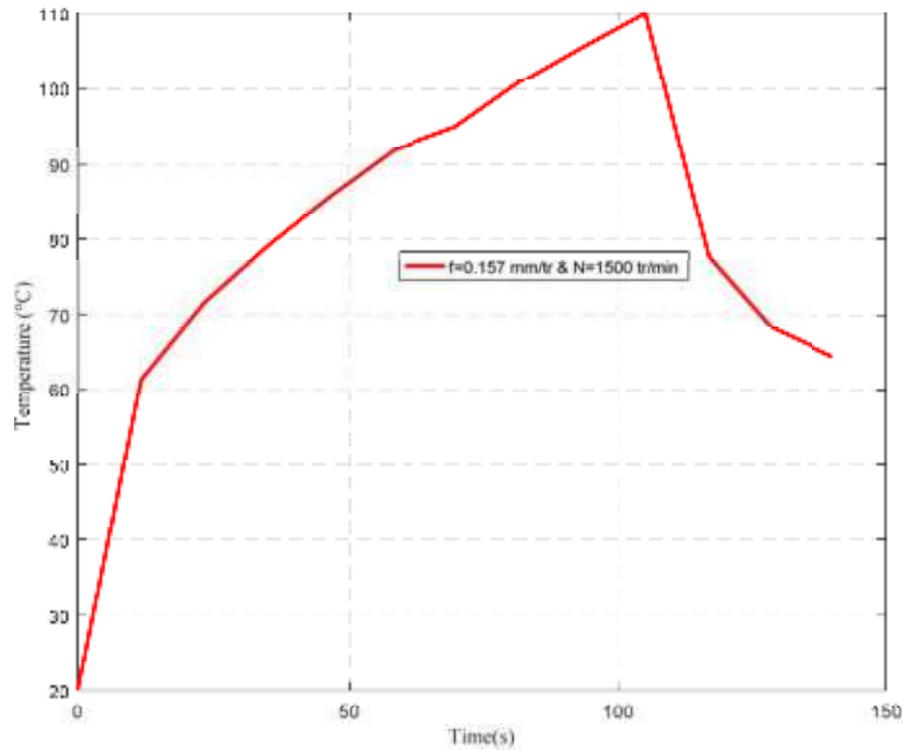


Figure IV.9 Température simulée en fonction du temps, avec $f=0.157$ mm/tr, $a=0.15$ mm, et $N=1500$ tr/min

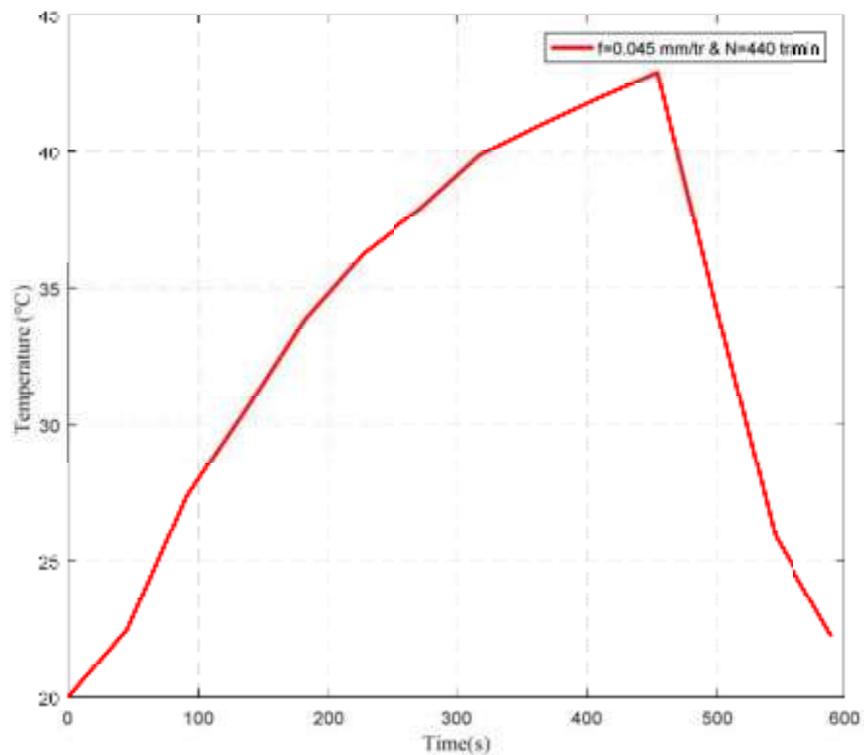


Figure IV.10 Température simulée en fonction du temps, avec $f=0.045$ mm/tr, $a=0.15$ mm, et $N=440$ tr/min

IV.4.3 Analyse comparative des résultats entre simulations et expérimentations

Cette analyse revêt une importance fondamentale pour valider nos modèles numériques, visant à évaluer leur fiabilité et précision en les comparant aux données réelles obtenues, à identifier les écarts entre les prévisions et les observations réelles, et à ajuster les paramètres du modèle pour améliorer sa précision. Elle offre également des perspectives cruciales pour comprendre les phénomènes thermiques complexes en jeu lors de l'usinage et pour optimiser les processus de fabrication.

Le logiciel Abaqus nous a permis de prédire le comportement thermique de l'outil dans diverses conditions d'usinage. Il offre une approche économique et rapide pour explorer différentes configurations de coupe, matériaux d'outil et paramètres d'usinage.

Nous nous engageons à examiner minutieusement les résultats de température de l'outil de coupe issus de nos simulations numériques et à les comparer rigoureusement avec les données expérimentales obtenues en conditions réelles. Cela nous permet d'évaluer dans quelle mesure nos modèles informatiques parviennent à reproduire avec précision les phénomènes observés dans le monde réel. Cette analyse permet également de détecter les éventuelles limitations, imprécisions ou biais présents dans nos modèles, offrant ainsi des pistes pour les améliorer et les affiner.

La comparaison entre les résultats des simulations et des expérimentations permet de valider les modèles numériques, de renforcer leur crédibilité et de fournir des bases solides pour des analyses futures.

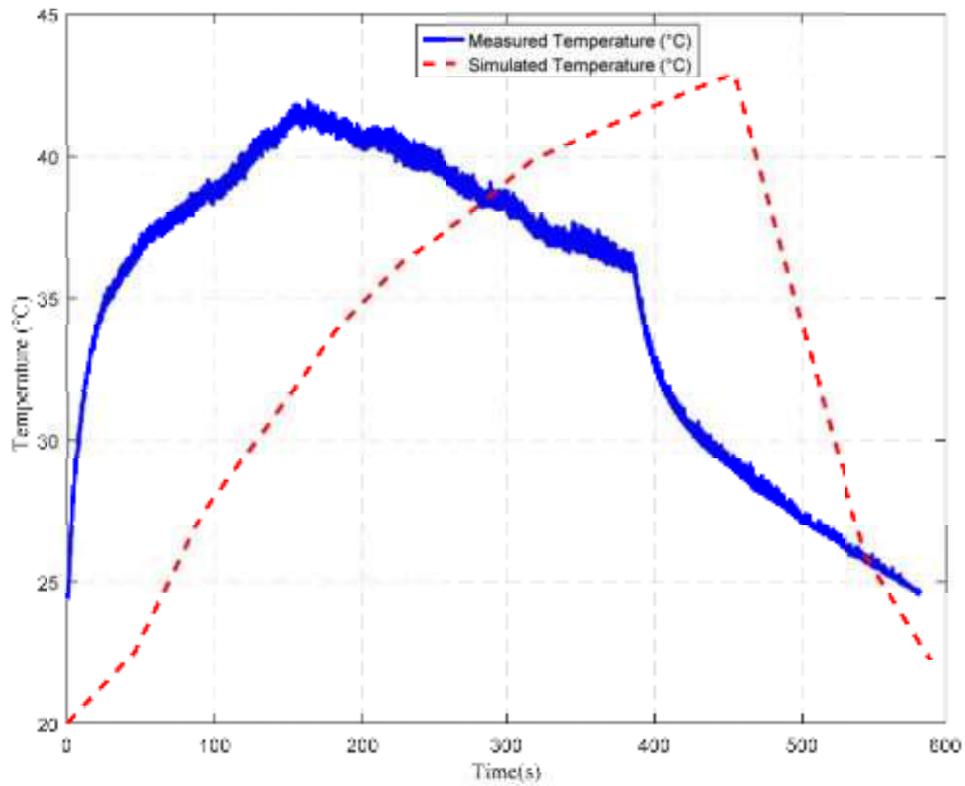


Figure IV.11 Comparaison entre les températures mesurées et simulées, avec $f=0.045$ mm/tr, $a=0.1$ mm, et $N=440$ tr/min

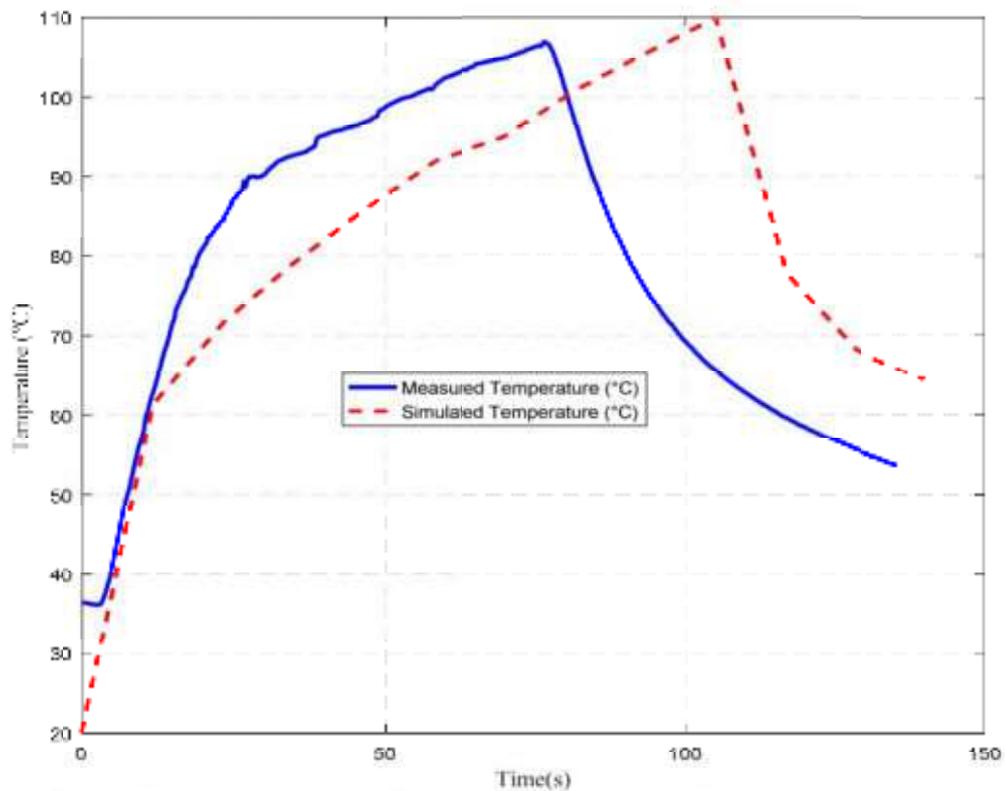


Figure IV.12 Comparaison entre les températures mesurées et simulées, avec $f=0.157$ mm/tr, $a=0.1$ mm, et $N=1500$ tr/min

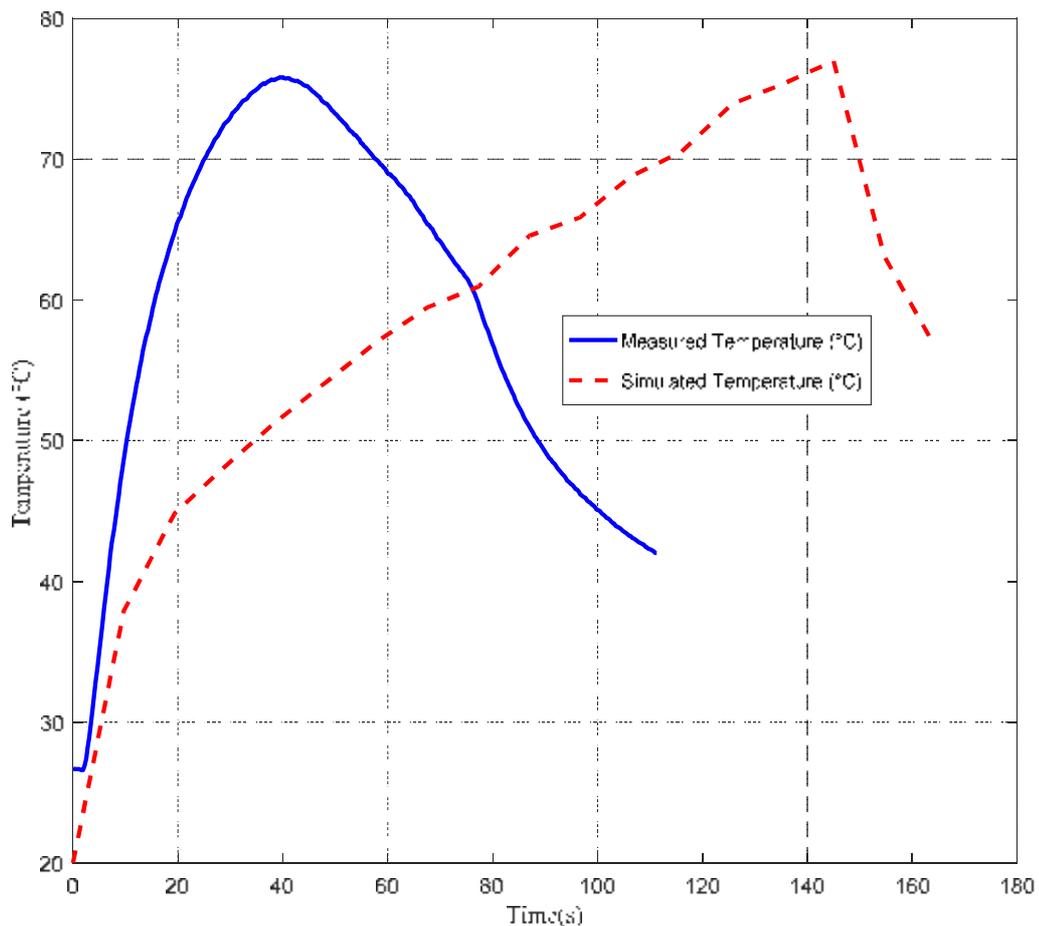


Figure IV.13 Comparaison entre les températures mesurées et simulées, avec $f=0.157$ mm/tr, $a=0.1$ mm, et $N=900$ tr/min

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons scruté les principaux paramètres qui ont eu un impact sur la température de l'outil de coupe, incluant la vitesse de coupe, la profondeur de passe, ainsi que les matériaux de la pièce et de l'outil. Nous procéderons à une comparaison entre les résultats des simulations et des expériences dans divers scénarios d'usinage afin d'évaluer la fiabilité de nos modèles numériques et d'identifier les facteurs prépondérants dans la variation de la température de l'outil.

Cette analyse comparative des résultats issus des simulations et des expérimentations constitue une approche complémentaire, permettant d'explorer les fluctuations de température au niveau de la plaquette en carbure. Cette approche contribue à approfondir notre compréhension des processus d'usinage, à optimiser les performances des outils, et à accroître l'efficacité globale des opérations de fabrication.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La recherche menée dans cette thèse représente une avancée significative dans la compréhension et l'optimisation des processus de tournage du matériau X200Cr12, largement utilisé dans diverses applications industrielles, notamment dans la fabrication d'outils de coupe et de matrices. En adoptant une approche multidisciplinaire combinant des méthodes expérimentales et numériques, cette étude explore en profondeur les effets des paramètres de coupe sur la température de coupe, un aspect critique dans le domaine de l'usinage. Les résultats de cette étude nous ont conduits à conclure les points suivants :

1. Les paramètres de coupe, tels que les vitesses de rotation (440, 740, 900, 1230, 1500 tr/min), les avances par tour (0.045, 0.084, 0.112, 0.157, 0.18, 0.225 mm/tr) et les profondeurs de coupe (0.1, 0.15, 0.2, 0.25 mm), ont un impact significatif sur la température générée lors du processus de tournage du X200Cr12. Une corrélation directe entre ces paramètres et la température de coupe a été établie, montrant une augmentation proportionnelle de la température avec l'augmentation des paramètres de coupe.
2. L'utilisation de la modélisation numérique avec ABAQUS offre une perspective complémentaire pour simuler et analyser le comportement thermique lors de l'usinage du X200Cr12. Les résultats des simulations ont validé les tendances observées lors des expériences pratiques et ont fourni des informations supplémentaires sur la distribution de la température dans la zone de coupe.
3. L'analyse comparative entre les outils de coupe revêtus et non revêtus a révélé que les plaquettes revêtues présentent une température plus élevée, attribuée aux propriétés thermiques supérieures du revêtement. Cette constatation souligne l'importance du choix du revêtement dans la gestion thermique lors de l'usinage.
4. La comparaison rigoureuse entre les résultats des simulations numériques et les données expérimentales a permis de valider les modèles développés, renforçant ainsi leur crédibilité et leur applicabilité dans le contexte industriel. Cette approche intégrée offre des perspectives prometteuses pour l'amélioration continue des processus de tournage et la résolution des défis de fabrication dans l'industrie manufacturière.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Groover, M. P. (1999). *Fundamentals of modern manufacturing : materials, processes, and systems*. Wiley.
- [2]. Davis, J. R., American Society For Metals, & Asm Handbook Committee. (1989). *Machining*. Asm International.
- [3]. Grigoriev, S. N., Fedorov, S. V., & Hamdy, K. (2019). Materials, properties, manufacturing methods and cutting performance of innovative ceramic cutting tools – a review. *Manufacturing Review*, 6, 19. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2019016>
- [4]. Joarder, A. (1994, May 1). High Speed Steels. *Eprints.nmlindia.org*. <http://eprints.nmlindia.org/5766>
- [5]. Stephenson, D. A., & Agapiou, J. S. (2016). *Metal Cutting Theory and Practice*. Boca Raton, Fl Crc Press.
- [6]. *Materiaux Pour Outils de Coupe*. (2009). Ed. Techniques Ingénieur.
- [7]. Zhangiang, L., & Xing, A. (2005). Cutting tool materials for high speed machining. *Progress in Natural Science*, 15(9), 777–783. <https://doi.org/10.1080/10020070512331342910>
- [8]. Rajan, R.A. (2017). Measurement of Cutting Temperature during Machining.
- [9]. Dolinsek, Slavko & Kopac, Janez. (2006). Mechanism and types of tool wear; particularities in advanced cutting materials. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 19. 11-18.
- [10]. Tanner, D., & Michael Thomas Dugger. (2003). Wear Mechanisms in a Reliability Methodology. *Proceedings of SPIE*. <https://doi.org/10.1117/12.476345>
- [11]. Khrushchev, M. and Babichev, M., Resistance to abrasive wear and the hardness of metals. Vol. 15. 1953: US Atomic Energy Commission, Technical Information Service.
- [12]. Tsujimoto, A., Barkmeier, W. W., Fischer, N. G., Nojiri, K., Nagura, Y., Takamizawa, T., Latta, M. A., & Miazaki, M. (2018). Wear of resin composites: Current insights into underlying mechanisms, evaluation methods and influential factors. *The Japanese Dental Science Review*, 54(2), 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2017.11.002>
- [13]. Burwell, J. T. (1957). Survey of possible wear mechanisms. *Wear*, 1(2), 119–141. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(57\)90005-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(57)90005-4)
- [14]. Quinn, T. F. J. (1983). Review of oxidational wear. *Tribology International*, 16(5), 257–271. [https://doi.org/10.1016/0301-679x\(83\)90086-5](https://doi.org/10.1016/0301-679x(83)90086-5)

- [15]. Guediche, M., Hamdi, H., Bergheau, J.-M., Mabrouki, T., & Donnet, C. (2017, October 24). MODélisation et Simulation de l'Usure des Outils de Coupe au cours du processus d'enlèvement de matière : Approche expérimentale et numérique (MOSUOC). Theses.fr. <https://www.theses.fr/2017LYSEE006>
- [16]. Shijun, Z., & Zhanqiang, L. (2009). Analytical and numerical solutions of transient heat conduction in monolayer-coated tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(5), 2369–2376. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.05.028>
- [17]. Zhao, J., & Liu, Z. (2020). Influences of coating thickness on cutting temperature for dry hard turning Inconel 718 with PVD TiAlN coated carbide tools in initial tool wear stage. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 1155–1165. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.010>
- [18]. Bobzin, K., Nazlim Bagcivan, Philipp Immich, Bolz, S., Cremer, R., & Leyendecker, T. (2008). Mechanical properties and oxidation behaviour of (Al,Cr)N and (Al,Cr,Si)N coatings for cutting tools deposited by HPPMS. *Thin Solid Films*, 517(3), 1251–1256. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.06.050>
- [19]. Kusiak, A., Battaglia, J.-L., & Rech, J. (2005). Tool coatings influence on the heat transfer in the tool during machining. *Surface and Coatings Technology*, 195(1), 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.01.007>
- [20]. Zhao, J., & Liu, Z. (2018). Effects of Thermo-physical properties of Ti_{0.41}Al_{0.59}N coating on transient and steady cutting temperature distributions in coated cemented carbide tools. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 96, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.05.024>
- [21]. Grzesik, W. (1998). The role of coatings in controlling the cutting process when turning with coated indexable inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 79(1-3), 133–143. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(97\)00491-3](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(97)00491-3)
- [22]. Rech, J., Kusiak, A., & Battaglia, J. L. (2004). Tribological and thermal functions of cutting tool coatings. *Surface and Coatings Technology*, 186(3), 364–371. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.11.027>
- [23]. Hao, G., Liu, Z., Liang, X., & Zhao, J. (2019). Influences of TiAlN Coating on Cutting Temperature during Orthogonal Machining H13 Hardened Steel. *Coatings*, 9(6), 355. <https://doi.org/10.3390/coatings9060355>
- [24]. Dahan, I., Admon, U., Frage, N., Sariel, J., & Dariel, M. P. (2000). Diffusion in Ti/TiC multilayer coatings. *Thin Solid Films*, 377-378, 687–693. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)01282-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(00)01282-7)

- [25]. Li, D., Wang, Q., Li, G., Lv, X., Nakajima, K., & He, J. (2008). Diffusion layer growth at Zn/Cu interface under uniform and gradient high magnetic fields. *Materials Science and Engineering: A*, 495(1), 244–248. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.10.096>
- [26]. Grzesik, W. (2006). Composite layer-based analytical models for tool–chip interface temperatures in machining medium carbon steels with multi-layer coated cutting tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 176(1), 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.02.025>
- [27]. Wang, J., Carson, J. A., North, M. F., & Cleland, D. J. (2006). A new approach to modelling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials. 49(17-18), 3075–3083. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.02.007>
- [28]. Zhang, S., & Liu, Z. (2009). A new approach to cutting temperature prediction considering the diffusion layer in coated tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(7-8), 619–624. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.01.010>
- [29]. Yang, K., Liang, Y., Zheng, K., Bai, Q., & Chen, W. (2010). Tool edge radius effect on cutting temperature in micro-end-milling process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 52(9-12), 905–912. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2795-z>
- [30]. Ismail Lazoglu, & Yusuf Altintas. (2002). Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining. 42(9), 1011–1022. [https://doi.org/10.1016/s0890-6955\(02\)00039-1](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(02)00039-1)
- [31]. Durul Ulutan, İsmail Lazoğlu, & Cenk Dinc. (2009). Three-dimensional temperature predictions in machining processes using finite difference method. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2), 1111–1121. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.020>
- [32]. Grzesik, W., Bartoszek, M., & Nieslony, P. (2004). Finite difference analysis of the thermal behaviour of coated tools in orthogonal cutting of steels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(14), 1451–1462. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.05.008>
- [33]. O’Sullivan, D., & Cotterell, M. (2001). Temperature measurement in single point turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 118(1-3), 301–308. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(01\)00853-6](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(01)00853-6)
- [34]. Islam, C., & Yusuf Altintas. (2019). A Two-Dimensional Transient Thermal Model for Coated Cutting Tools. *Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the Asme*, 141(7). <https://doi.org/10.1115/1.4043578>

- [35]. Chandra, A., & Chan, C. L. (1994). Thermal aspects of machining: A BEM approach. *International Journal of Solids and Structures*, 31(12), 1657–1693. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(94\)90213-5](https://doi.org/10.1016/0020-7683(94)90213-5)
- [36]. Du, F. K., Lovell, M. R., & Wu, T. (2001). Boundary element method analysis of temperature fields in coated cutting tools. 38(26-27), 4557–4570. [https://doi.org/10.1016/s0020-7683\(00\)00291-2](https://doi.org/10.1016/s0020-7683(00)00291-2)
- [37]. Davies, M. A., Ueda, T., M'Saoubi, R., Mullany, B., & Cooke, A. L. (2007). On The Measurement of Temperature in Material Removal Processes. *CIRP Annals*, 56(2), 581–604. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.009>
- [38]. J Pujana, L del Campo, Pérez-Sáez, R. B., Tello, M. J., Gallego, I., & Arrazola, P. J. (2007). Radiation thermometry applied to temperature measurement in the cutting process. *Measurement Science and Technology*, 18(11), 3409–3416. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/11/022>
- [39]. Rezende, B. A., Magalhães, F. de C., & Campos Rubio, J. C. (2020). Study of the measurement and mathematical modelling of temperature in turning by means equivalent thermal conductivity. *Measurement*, 152, 107275. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107275>
- [40]. Armendia, M., Garay, A., Villar, A., Davies, M. A., & Arrazola, P. J. (2010). High bandwidth temperature measurement in interrupted cutting of difficult to machine materials. *CIRP Annals*, 59(1), 97–100. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.059>
- [41]. Mo, J. L., Zhu, M. H., Lei, B., Leng, Y. X., & Huang, N. (2007). Comparison of tribological behaviours of AlCrN and TiAlN coatings—Deposited by physical vapor deposition. *Wear*, 263(7-12), 1423–1429. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.051>
- [42]. Nemetz, A. W., Daves, W., Klünsner, T., Ecker, W., Teppernegg, T., Czettel, C., & Krajinović, I. (2018). FE temperature- and residual stress prediction in milling inserts and correlation with experimentally observed damage mechanisms. *Journal of Materials Processing Technology*, 256, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.01.039>
- [43]. Müller, B., & Renz, U. (2003). Time resolved temperature measurements in manufacturing. *Measurement*, 34(4), 363–370. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2003.08.009>
- [44]. Bernhard Müller, & Renz, U. (2001). Development of a fast fiber-optic two-color pyrometer for the temperature measurement of surfaces with varying emissivities. 72(8), 3366–3374. <https://doi.org/10.1063/1.1384448>

- [45]. Saelzer, J., Berger, S., Iovkov, I., Zabel, A., & Biermann, D. (2020). In-situ measurement of rake face temperatures in orthogonal cutting. *CIRP Annals*, 69(1), 61–64. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.021>
- [46]. Hopkins, C., & Hosseini, A. (2019). A Review of Developments in the Fields of the Design of Smart Cutting Tools, Wear Monitoring, and Sensor Innovation. *IFAC-PapersOnLine*, 52(10), 352–357. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.056>
- [47]. Alemohammad, H., Toyserkani, E., & Paul, C. P. (2007). Fabrication of smart cutting tools with embedded optical fiber sensors using combined laser solid freeform fabrication and moulding techniques. *Optics and Lasers in Engineering*, 45(10), 1010–1017. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2007.04.006>
- [48]. Mikael, F. (2012). Microstructural, Mechanical and Tribological Characterisation of CVD and PVD Coatings for Metal Cutting Applications. <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:516909/FULLTEXT01.pdf>
- [49]. Olsson, M. (2021, June 11). Machinability of Single-phase Materials: Surface integrity and tool wear analysis. Lund University. <https://portal.research.lu.se/en/publications/machinability-of-single-phase-materials-surface-integrity-and-too>
- [50]. Nilesh, B, Asha I.(November 2017).experimental investigation of environment friendly cooling methods for different machining conditions
- [51]. Boulanouar, L. (n.d.). Etude de l'endommagement des outils de coupe en céramique noire et en CBN lors du tournage d'un acier durci. *Www.academia.edu*. Retrieved March 17, 2024, from : https://www.academia.edu/18678295/Etude_de_lendommagement_des_outils_de_coupe_en_c%C3%A9ramique_noire_et_en_CBN_lors_du_tournage_dun_acier_durci
- [52]. Guediche, M. (2017, October 24). MODélisation et Simulation de l'Usure des Outils de Coupe au cours du processus d'enlèvement de matière : Approche expérimentale et numérique (MOSUOC). *Theses.hal.science*. <https://theses.hal.science/tel-02493414/>
- [53]. Bouchelaghem, H. (2011). Etude Du Comportement Des Outils Cbn Lors De L'usage De L'acier Fortement Allie AISI D 3. *Dspace.univ-Guelma.dz*. <https://dspace.univ-guelma.dz/xmlui/handle/123456789/304>
- [54]. Mohamed Athmane Yallese, Rigal, J.-F., Kamel Chaoui, & Lakhdar Boulanouar. (2005). The effects of cutting conditions on mixed ceramic and cubic boron nitride tool wear and on surface roughness during machining of X200Cr12 steel (60

HRC). Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 219(1), 35–55. <https://doi.org/10.1243/095440505x8082>

Résumé : La température de coupe revêt une importance capitale dans les opérations d'usinage, car elle exerce une influence déterminante sur la durabilité de l'outil de coupe. Les paramètres de coupe ainsi que le matériau constitutif de la plaquette sont des variables cruciales qui conditionnent la température lors du processus de tournage. Cette étude se penche sur l'acier X 200 Cr 12 et combine des expériences pratiques avec des simulations numériques pour évaluer la température de coupe. Un thermocouple est utilisé dans l'approche expérimentale afin de mesurer cette température, tandis qu'une méthode des éléments finis (MEF) exploitant le logiciel ABAQUS, et intégrant le modèle de matériau Johnson-Cook, est employée pour la modélisation. Les résultats indiquent une augmentation de la température de coupe en fonction de la profondeur de coupe, de la vitesse d'avance et de la vitesse de rotation. En raison de la haute conductivité du revêtement de la plaquette, la température de l'outil de coupe atteint des niveaux significativement plus élevés que ceux observés avec des plaquettes non revêtues. De plus, la conductivité de la plaquette exerce une influence sur la température de coupe, avec la vitesse d'avance et la profondeur de coupe se révélant être les paramètres les plus influents.

Mots clefs : Température de coupe, Tournage, X200Cr12, Plaquettes revêtues, Paramètres de coupe

Abstract: The temperature during cutting represents a critical aspect of machining operations as it directly affects the longevity of the cutting tool. Cutting parameters and the material composition of the insert are fundamental factors that influence temperature fluctuations during turning processes. This study involved practical experiments and numerical simulations specifically focusing on X 200 Cr 12 steel during turning operations. Assessing the temperature of the cutting tool involved the use of a thermocouple within the experimental setup. Simultaneously, a finite element method (FEM) employing the explicit ABAQUS software, integrating the Johnson-Cook material model, was utilized for modeling purposes. The findings reveal that cutting temperature escalates with increased cutting depth, feed rate, and rotational speed. Notably, owing to the elevated conductivity of the insert coating, the cutting tool's temperature reaches significantly higher thresholds compared to uncoated inserts. The conductivity of the insert directly influences cutting temperature, with the feed rate and cutting depth emerging as the most influential parameters.

Key words: finite element method, Cutting temperature, turning, thermocouple, X200Cr12, hard machining.

ملخص: درجة حرارة القطع هي ظاهرة حاسمة مرتبطة بعمليات الخراطة لأنها تؤثر على عمر أداة القطع. تعتبر معلمات القطع بالإضافة إلى مادة الشريحة شروطاً أساسية تؤثر على درجة الحرارة أثناء الخراطة. في هذا البحث، تم إجراء تجارب عملية بالإضافة إلى محاكاة رقمية على الفولاذ X 200 Cr 12 أثناء عملية الخراطة. لتقييم درجة حرارة أداة القطع، تم استخدام محول حراري في إطار النهج التجريبي. بالمقابل، تم استخدام طريقة العناصر المحدودة (MEF) باستخدام برنامج ABAQUS، وتضمن نموذج مادة بنموذج Johnson-Cook. تُظهر النتائج أن درجة حرارة القطع تزيد مع عمق القطع وسرعة التقدم وسرعة الدوران. نظرًا للتوصيلية العالية لطلاء الشريحة، تصل درجة حرارة أداة القطع إلى مستويات أعلى بكثير مما هو الحال في حالة الشرائح الغير المطلية. التوصيلية للشريحة تؤثر على درجة حرارة القطع. أكثر العوامل تأثيرًا على درجة حرارة القطع هي سرعة التقدم وعمق القطع.

الكلمات المفتاحية: طريقة العناصر المحدودة، درجة حرارة القطع، الخراطة، المحول الحراري، X200Cr12، الخراطة الصعبة.