

République Algérienne Démocratique Et Populaire Ministère De
L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique



Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique

PROJET DE FIN D'ETUDE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master
Spécialité : Génie mécanique
Option : Énergétique

THEME

**Etude Et Choix Des Modèles De Modélisation D'usure Des
Outils De Coupe En Usinage**

Par :

BOUGRIDA Karim

MELLIKECHE Fateh

Soutenu le 26/06/2025 devant le jury composé :

Dr. Lekhal R	Université de Bouira	Président
Dr. Dahmane M	Université de Bouira	Examineur
Dr. Merzouk M	Université de Bouira	Encadrant

Année Universitaire 2022-2023



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة) يو قريده كريمالصفة: طالب، استاذ، باحث طالب
الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 111401366 والصادرة بتاريخ 2018/10/28
المسجل(ة) بكلية / معهد كلية العلوم التطبيقية قسم هندسة ميكانيكية
والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).
عنوانها: Etude et choix des modèles de modélisation d'une
des outils de coupe en usinage.
تحت إشراف الأستاذ(ة): هرزوق مزيان
أصريح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 21/06/2020

توقيع المعني(ة) Yus

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

النسبة:

% 20

الامضاء:





نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة)..... مليتش فاتحالصفة: طالب، استاذ، باحث..... طالب

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية:..... 407693555والصادرة بتاريخ: 2023/11/11

المسجل(ة) بكلية / معهد..... كلية العلوم التطبيقية قسم..... هندسة ميكانيكية

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها:..... Etude et choix des modèles de modélisation de

L'usure des outils de coupe en usinage.

تحت إشراف الأستاذ(ة):..... مرزوق مزيان

أصح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ:..... 21/06/2025

ف.ف.ف

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

النسبة:

22.5 %

الامضاء:



Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

*Avant tout, nous remercions très sincèrement **monsieur Merzouk Meziane**, notre encadrant, pour sa disponibilité, son accompagnement bienveillant, ses conseils éclairés et la qualité de son encadrement tout au long de ce travail. Sa gentillesse et sa patience dans l'élaboration et la finalisation de ce mémoire.*

*Nous souhaitons également remercier chaleureusement **les membres du jury**, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail, ainsi que pour l'intérêt qu'ils y ont porté. Leurs remarques et suggestions seront précieuses pour la suite de notre parcours académique et professionnel.*

Résumé

L'usinage par enlèvement de matière est un procédé clé de fabrication industrielle, mais la durabilité des outils de coupe, soumis à des contraintes thermiques et mécaniques extrêmes, reste un défi majeur. Ce mémoire vise à étudier les mécanismes d'usure des outils et à développer des modèles prédictifs pour optimiser les procédés d'usinage. Une approche combinant revue bibliographique, simulations numériques avec le logiciel DEFORM, et analyses expérimentales a été adoptée. Les mécanismes d'usure (abrasion, adhésion, diffusion) et leurs formes (cratère, dépouille) ont été analysés, et plusieurs modèles empiriques et analytiques (Taylor, Archard, Usui) ont été évalués. Les résultats montrent que l'usure est fortement influencée par la vitesse de coupe et les propriétés des matériaux. Les simulations ont permis de prédire les zones critiques de frottement et les variations thermiques. Ce travail apporte des outils fiables pour prolonger la durée de vie des outils, réduire les coûts et améliorer la qualité des pièces usinées, contribuant ainsi à l'optimisation des procédés industriels.

Mots clés : Usinage, Durabilité des outils de coupe, Mécanismes d'usure (abrasion, adhésion, diffusion), Formes d'usure (cratère, dépouille), Modèles prédictifs (Taylor, Archard, Usui), Simulations numériques (DEFORM).

Abstract

Machining by material removal is a key industrial manufacturing process, yet the durability of cutting tools, subjected to extreme thermal and mechanical stresses, remains a major challenge. This thesis aims to study the wear mechanisms of cutting tools and develop predictive models to optimize machining processes. A methodology combining a literature review, numerical simulations using DEFORM software, and experimental analyses was adopted. Wear mechanisms (abrasion, adhesion, diffusion) and their forms (crater, flank) were analyzed, and several empirical and analytical models (Taylor, Archard, Usui) were evaluated. Results show that tool wear is strongly influenced by cutting speed and material properties. Simulations helped predict critical friction zones and thermal variations. This work provides reliable tools to extend tool life, reduce costs, and improve the quality of machined parts, contributing to the optimization of industrial processes.

Keywords : Machining, Cutting tool durability, Wear mechanisms (abrasion, adhesion, diffusion), Wear forms (crater, flank wear), Predictive models (Taylor, Archard, Usui), Numerical simulations (DEFORM).

الملخص

يُعدّ التشغيل عن طريق إزالة المادة أحد العمليات الأساسية في التصنيع الصناعي، إلا أن متانة أدوات القطع التي تتعرض لإجهادات حرارية وميكانيكية شديدة تظل تحديًا كبيرًا. يهدف هذا البحث إلى دراسة آليات تآكل أدوات القطع وتطوير نماذج تنبؤية لتحسين عمليات التشغيل. تم اعتماد منهجية تجمع بين مراجعة أدبية، وتحليلات تجريبية. تم تحليل آليات التآكل (التآكل الكاشط، DEFORM محاكاة رقمية باستخدام برنامج الالتصاق، الانتشار) وأشكالها (الحفرة، التآكل الجانبي)، وتم تقييم عدة نماذج تجريبية وتحليلية (تايلور، أرشارد أوسوي). أظهرت النتائج أن التآكل يتأثر بشكل كبير بسرعة القطع وخصائص المواد. ساعدت المحاكاة في التنبؤ بالمناطق الحرجة للاحتكاك والتغيرات الحرارية. يقدّم هذا العمل أدوات موثوقة لإطالة عمر الأدوات تقليل التكاليف، وتحسين جودة الأجزاء المصنعة، مما يساهم في تحسين العمليات الصناعية.

الكلمات المفتاحية: التشغيل الآلي، متانة أدوات القطع، آليات التآكل (تآكل كاشط، التصاق، انتشار)، أشكال التآكل (حفرة، تآكل جانبي)، نماذج تنبؤية (تايلور، أرشارد، أوسوي)، محاكاة رقمية (deform)

Nomenclature

Symbole / Abréviation	Définition
V_c	Vitesse de coupe (m/min)
V_f	Vitesse d'avance (mm/min)
f	Avance par tour (mm/tr)
a_p	Profondeur de passe (mm)
V_b	Largeur d'usure en dépouille (mm)
K_T	Profondeur du cratère (mm)
K_M	Position du cratère sur la face de coupe
T	Durée de vie de l'outil (min)
F_n	Effort normal appliqué (N) – modèle d'Archard
P_m	Contrainte d'écoulement du matériau le plus mou (MPa)
d	Distance parcourue (m) – modèle d'Archard
K	Coefficient d'usure (sans unité) – modèle d'Archard
q	Contrainte normale au point de contact (Pa)
T	Température de coupe (K ou °C)
θ	Température de coupe (K ou °C)
E_a	Énergie d'activation du processus de diffusion
R	Constante des gaz parfaits universel (8.314 J/mol·K)
δ_n	Contrainte normale sur la surface de contact – modèle d'Usui
V_g	Vitesse de glissement (mm/s) – modèle d'Usui
n, C	Constantes de la loi de Taylor
C₁, C₂	Constantes empiriques – modèle d'Usui
G, D	Constantes liées au matériau – modèle Takeyama & Murata
R_a	Rugosité moyenne de surface (μm)

Abréviations / Termes Techniques

Abréviation /Terme	Signification
DEFORM	Logiciel de simulation par éléments finis (FEM) utilisé pour l'usinage
FEM	Finite Element Method (Méthode des éléments finis)
CBN	Cubic Boron Nitride – Nitrure de bore cubique
PVD	Physical Vapor Deposition – Dépôt physique en phase vapeur
TiN, TiAlN	Revêtements durs pour outils de coupe
IN718	Inconel 718 – Superalliage à base de nickel
CD	Diamant polycristallin (Polycrystalline Diamond)
CT	Cermet (céramique-métal)
CC	Céramiques
GC	Carbures revêtus
C	Carbures non revêtus
ISO 3685, ISO 8688	Normes ISO relatives à la modélisation de la durée de vie des outils
SME	Scanning Microscopy Electron – Microscopie électronique à balayage
EDX	Spectroscopie à dispersion d'énergie (analyse chimique par faisceau d'électrons)
CNC	Computer Numerical Control – Commande numérique par ordinateur
HRC	Dureté Rockwell C (échelle de dureté)

Table des matières

Remerciement

Résumé

Nomenclature

Abréviations / Termes Technique

Introduction générale 1

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction 2

I.2 Recherches scientifiques sur l'usure des outils coupants..... 2

I.3 Conclusion..... 7

CHAPITRE II : GENERALITE SUR L'USINGE

II.1 Aspects fondamentaux de l'usinage 8

II.2 Introduction 8

II.3 Définition et principes de fondement de l'usinage 8

II.3.1 Outil de coupe 8

II.3.2 Pièce à usiner..... 8

II.3.3 Mouvement relatif..... 8

II.4 Les différents procédés d'usinage 9

II.4.1 Tournage 9

II.4.2 Fraisage 14

II.4.3 Perçage 16

II.4.4 Rabotage..... 17

II.5 Paramètres et critères influençant la qualité d'usinage 18

II.6 Outils coupants..... 19

II.6.1 Introduction aux outils coupants 19

II.6.2 Eléments de l'outil coupant [24] 20

II.6.3 Cinématique de l'outil de coupe 21

II.6.4	Différents types d'outils de coupe et leurs applications.....	22
II.6.5	Matériaux et propriétés des outils de coupe	24
II.6.6	Choix du matériau de l'outil de coupe	25
II.7	Conclusion.....	25

CHAPITRE III : MECANISMES D'USURE DES OUTILS ET METHODES DE MODELISATION

III.1	Mécanismes d'usure des outils	26
III.1.1	Définition de l'usure	26
III.1.2	Formes d'usures d'outil.....	26
III.1.3	Modes d'usure en usinage.....	28
III.1.4	Prévision de l'usure des outils de coupe.....	29
III.1.5	Solutions haute technologie pour protéger vos outils contre l'usure.....	30
III.1.6	Conclusion :	30
III.2	Méthodes de modélisation.....	31
III.2.1	Modèles empiriques d'usure (Loi d'usure)	31
III.2.2	Modèles analytiques.....	34
III.2.3	Modèle Numérique.....	35
III.2.4	Simulation DEFORM "Processus d'usinage"	38
III.2.5	Conclusion.....	38

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1	Introduction	38
IV.2	Discussion des résultats de simulation Deform	38
IV.2.1	Distribution de la température.....	38
IV.2.2	Représentation graphique de la variation de température	39
IV.2.3	Évolution des charges en fonction du temps.....	39
IV.2.4	Volume enlevé au cours du temps	41
IV.2.5	Conclusion.....	41
IV.3	Résultats de calcul de l'usure avec le modèle de Taylor modifié	42
IV.3.1	Equation de modèle Taylor modifiée	42

IV.3.2	Code de calcul MATLAB	42
IV.3.3	Influence de la vitesse sur usure (V_b) en fonction de temps.....	43
IV.3.4	Influence de la profondeur de passe (a_p) sur l'usure V_b	46
IV.4	Résultats de calcul d'usure par le modèle Archard.....	48
IV.4.1	Code de calcul MATLAB	49
IV.4.2	Résultats de l'évolution du volume d'usure (V) en fonction de la charge appliquée (F_p)	49
IV.5	L'importance de la modélisation et le choix des modèles en usinage	50
IV.6	Conclusion.....	51
	Conclusion générale	52
	Références	53

Liste des figures

CHAPITRE II : GENERALITE SUR L'USINGE

Figure II.4-1: Procédé de tournage.....	9
Figure II.4-2: Machine de tournage.....	9
Figure II.4-3 : Mécanisme de coupe des métaux lors de l'opération de tournage [14]	10
Figure II.4-4 : Opérations fondamentales en tournage	10
Figure II.4-5 : Mouvements concernant outil / pièce	11
Figure II.4-6 : Configuration de coupe.....	12
Figure II.4-7 : Mouvement de coupe rectiligne	13
Figure II.4-8 : Mouvement de coupe rectiligne	13
Figure II.4-9 : L'avance par tour f.....	14
Figure II.4-10 : Fraiseuse	14
Figure II.4-11 : Opération fraisage de face.....	15
Figure II.4-12 : Opération de fraisage en opposition.....	16
Figure II.4-13 : Opération de fraisage en concordance	16
Figure II.4-14 : Perçage.....	17
Figure II.4-15 : Perceuse	17
Figure II.4-16 : Rabotage.....	18
Figure II.6-1 : Arêtes et parties actives d'un outil de tournage	20
Figure II.6-2 : Angles de l'outil.....	21
Figure II.6-3 : Outils de tournage	22
Figure II.6-4 : Opérations de tournage	22
Figure II.6-5 : Outils de fraisage	23
Figure II.6-6 : Opérations d'usinages en fraisage.....	23
Figure II.6-7: Choix du matériau des outils des coupes.....	25

CHAPITRE III : MECANISMES D'USURE DES OUTILS ET METHODES DE MODELISATION

Figure III.1-1 : Evolution de l'usure dans le temps.....	26
Figure III.1-2 : Forme d'usure en cratère	27
Figure III.1-3 : Zone d'usure en dépouille de l'outil.....	27
Figure III.1-4 : Zone d'usure en dépouille de l'outil en face	27
Figure III.1-5 : Classification des modes de l'usure en fonction des paramètres d'usinage....	28

Figure III.1-6 : Usure par abrasion.....	28
Figure III.1-7 : Usure par adhésion.....	29
Figure III.1-8 : Usure par diffusion.....	29
Figure III.2-1 : Analyse graphique par la loi de Taylor [32].....	31
Figure III.2-2 : Représentation graphique des modèles de l'usure	33
Figure III.2-3 : Avant l'opération	38

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

Figure IV.3-1 : Schéma de procédure de calcul MATLAB	42
Figure IV.3-2: Variation d'usure en fonction de temps pour la vitesse $V=50$ (m/min)	44
Figure IV.3-3: Variation d'usure en fonction de temps pour la vitesse $V=80$ (m/min)	45
Figure IV.3-4: Représentation graphique de point critique d'usure (V_b) en fonction de temps	46
Figure IV.4-1: Schéma des étapes de calcul du volume d'usure (v) MATLAB.....	49
Figure IV.4-2: l'évolution du volume d'usure (V) en fonction de la charge appliquée (F_p) ...	50

Liste des tableaux

CHAPITRE II : GENERALITE SUR L'USINGE

Tableau II.6-1: Opérations de tournage	23
Tableau II.6-2 : Opérations d'usinages en fraisage.....	24

CHAPITRE III : MECANISMES D'USURE DES OUTILS ET METHODES DE MODELISATION

Tableau III.2-1 : Evolution des modèles analytiques d'usure au fil des années	33
Tableau III.2-2 : Différent modèle analytique.....	35
Tableau III.2-3: Propriétés du Carbure de Tungstène (WC).....	37
Tableau III.2-4 : Constituants de l'Inconel 718.....	37
Tableau III.2-5 : Récapitulatif des données pour l'opération d'usinage sur DEFORM.....	37

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau IV.3-1 : Résultats de calcul MATLAB.....	43
Tableau IV.3-2: Résultats de calcul $V_b(t)$ avec des différentes vitesses et paramètres	43
Tableau IV.3-3: Variation d'usure en fonction de temps pour la vitesse $V=25$ (m/min)	43
Tableau IV.3-4: Variation d'usure en fonction de temps pour la vitesse $V=50$ (m/min).....	44
Tableau IV.3-5: Variation d'usure en fonction de temps pour la vitesse $V=80$ (m/min).....	45
Tableau IV.3-6: variation de la profondeur de passe (a_p) pour $V_c=25$ m/min	46
Tableau IV.3-7: variation de la profondeur de passe (a_p) pour $V_c=50$ m/min	47
Tableau IV.3-8 : variation de la profondeur de passe (a_p) pour $V_c=80$ m/min	47
Tableau IV.4-1: Donnée extrait d'après l'article [bloul et al] [2]	48
Tableau IV.4-2: Volume d'usure (v) en fonction de la charge (F_p) pour $t=4.53$ min et $V_c=35$ m/min	49
Tableau IV.4-3: Volume d'usure (v) en fonction de la charge (F_p) pour $t=0.86$ min et $V_c=50$ m/min	49
Tableau IV.4-4: Volume d'usure (v) en fonction de la charge (F_p) pour $t=2.26$ min et $V_c=70$ m/min	49

Introduction générale

L'usinage est un procédé qui consiste à retirer de la matière, est une méthode de fabrication les plus utilisées dans l'industrie. L'efficacité de cette technique s'appuie principalement sur la durabilité des outils de coupe, qui doivent résister à des conditions extrêmes de chaleur et de contraintes mécaniques.

L'usure de ces outils constitue donc un défi économique de premier plan ayant un impact direct sur la productivité, l'exactitude des pièces produites et les coûts associés à la fabrication.

Ce travail de recherche se divise en quatre chapitres, chacun sert à l'analyse des différents éléments de l'usure des outils de coupe et aux méthodes employées pour sa modélisation et sa prédiction.

Le premier chapitre présente une étude bibliographique approfondie des travaux antérieurs sur l'usure des outils

Le deuxième chapitre aborde les généralités sur l'usinage en détaillant les principes fondamentaux des différents procédés (tournage, fraisage, perçage, etc.). Les paramètres de coupe influencent sur la qualité de la pièce usinée, ce chapitre établit les bases théoriques nécessaires à la compréhension des phénomènes d'usure.

Le troisième chapitre se focalise sur l'examen des processus qui provoquent l'usure des outils ainsi que sur les diverses méthodes de modélisation. Aborde les principaux types d'usure (cratère, dépouille), les processus impliqués (abrasion, adhésion, diffusion), ainsi que les modèles utilisés pour en anticiper l'évolution qu'ils soient empiriques (telles que les lois de Taylor et de Gilbert), analytiques (comme les modèles de Takeyama et Murata, Usui, ou Archard) ou numériques. Une attention particulière est portée à l'implémentation de ces modèles dans le logiciel DEFORM.

Le quatrième chapitre présente les résultats de nos simulations et expérimentations, tel que l'évolution de la température dans l'outil et la pièce et les forces exercées sur l'outil, le volume de matière retirée, ainsi que le calcul de l'usure de dépouille (V_b) selon différents modèles. Une analyse comparative des modèles de Taylor modifié et d'Achard est également proposée mettant en évidence leurs avantages et limitations respectifs.

L'objectif de ce mémoire est d'approfondir l'analyse des phénomènes de l'usure des outils de coupe et de mettre au point des outils efficaces pour améliorer les procédés d'usinage en milieu industriel. Le contrôle de l'usure des outils constitue un facteur clé pour accroître la productivité et diminuer les coûts de production dans l'industrie contemporaine.

CHAPITRE I
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

Ce chapitre offre une récapitulation des études principales axées sur la modélisation et la simulation de l'usure des outils de coupe. Des recherches et des travaux réalisés par différents auteurs y est étudiée en détail. Leurs approches, qu'elles reposent sur la méthode des éléments finis, des formulations analytiques ou des approches expérimentales, Offrent la possibilité de mieux cerner les mécanismes d'usure (abrasion, diffusion, adhésion, rupture) et de leur impact sur Durabilité des outils.

I.2 Recherches scientifiques sur l'usure des outils coupants.

A. Attanasio et al [1] ont réalisé une étude sur l'usure des outils de tournage en carbure non revêtus en recourant à la méthode des éléments finis (FEM). En utilisant le logiciel Deform 3D enrichi d'un sous-programme dédié, les auteurs ont simulé le processus de coupe tout en mettant à jour la géométrie de l'outil au fur et à mesure de son usure. Pour dépasser les limites des modèles analytiques traditionnels un nouveau modèle combinant les mécanismes d'usure abrasive et diffusive a été développé.

Des essais expérimentaux réalisés sur de l'acier AISI 1045 ont permis de valider les simulations qui ont montré une bonne concordance avec les données réelles, notamment pour présente la comparaison entre les paramètres KT (profondeur du cratère) et KM (position du cratère).

Les auteurs ont montré que leur modèle combiné permet non seulement de simuler des opérations de coupe non orthogonales, mais également de suivre avec précision Le changement au fil du temps de l'usure. En revanche, ils ont relevé des écarts significatifs aux vitesses et avances élevées suggérant que ces paramètres influencent les coefficients du modèle ce qui nécessitera des ajustements futurs. Par ailleurs, ils ont mis en évidence que la rupture de l'outil est liée à la contrainte maximale et à l'angle de coupe effectif et que la simulation FEM permet d'identifier efficacement les conditions de coupe pouvant conduire à une défaillance de l'outil.

B. Bloul et al [2] ont étudié l'usure de la face de dépouille des outils de tournage en établissant des relations avec divers paramètres de coupe. Un modèle d'usure a été élaboré pour mieux prédire l'évolution de l'outil et modifier de façon idéale les réglages de coupe, tout en tenant compte des aspects de dépôt de matière sous forme d'arête rapportée, susceptibles de nuire à la qualité de l'état de surface.

Les données expérimentales ont révélé qu'une vitesse de coupe excessive (supérieures à 70 m/min) entraînent une usure rapide de l'outil réduisant sa durée de vie. L'usure a été principalement attribuée à l'abrasion due à la dureté du matériau usiné (Inconel 718). Par

ailleurs, si l'arête rapportée peut jouer un rôle protecteur en ébauche il devient nuisible en finition, compromettant la qualité finale des surfaces usinées. Cette étude souligne la nécessité de concevoir des modèles prédictifs pour l'usure et la rugosité dans le but d'identifier les conditions de coupe idéales permettant d'allier efficacité d'usinage, qualité de finition et longévité des outils.

L.Zhibo et al [3] Ont développent un modèle d'usure d'outil appliqué au fraisage d'un alliage de titane (TC4) en s'appuyant sur la méthode de simulation 3D par éléments finis. Le but est de perfectionner l'estimation de l'usure des outils, un élément important pour leur durabilité et la qualité de surface des pièces fabriquées.

Ce modèle tient compte de plusieurs formes d'usure afin d'augmenter la justesse des prédictions.

Les résultats obtenus par simulation ont été corroborés par des essais pratiques, montrant une erreur inférieure à 30 %.

L'étude présente également une expression empirique permettant d'estimer rapidement la durabilité des outils, sans avoir besoin de modélisations complexes, cela conduit à une réduction des temps d'exécution, apportant un bénéfice considérable aux industriels. Cette étude est donc une avancée importante pour suivre l'usure des outils, estimer leur durabilité et améliorer leur conception dans les processus de fraisage.

F. Salvatore et al [4] Ont développé une approche innovante pour prédire l'évolution de l'usure de l'outil durant le processus d'usinage. Plus précisément, il s'appuie sur une méthode énergétique qui établit un lien entre le volume d'usure de l'outil et l'énergie dissipée par frottement. Par ailleurs, l'étude examine l'interaction entre les contraintes résiduelles générées par l'opération de coupe et les changements géométriques de l'outil à cause des mécanismes d'usure.

Afin de mener cette étude, la méthodologie proposée comporte trois parties distinctes. Dans la première partie les mesures de l'usure de l'outil sont présentées.

Ensuite, l'approche de l'énergie est présentée et modifiée une simulation numérique de l'opération de coupe orthogonale en utilisant le code FEM commercial ABAQUS/Explicit.

La section finale présente les résultats numériques relatifs à l'évolution de l'usure de l'outil obtenus par simulation, ainsi que la conclusion générale du travail.

Ils ont trouvé que les premiers résultats de l'approche énergétique FEM sur l'usure des outils semblent prometteurs nécessitant une étude complémentaire sur l'énergie de fracture.

Une méthode est proposée pour réduire significativement le temps de calcul nécessaire à la simulation, En mettant en évidence la difficulté de maîtriser l'interaction entre le copeau et la surface usinée.

La méthode conserve l'historique de l'usinage dans la pièce finie, permettant de dériver les contraintes résiduelles induites.

H. Takeyama et al [5] Ont réalisé une recherche de base portant sur l'usure des outils et leur longévité, en se concentrant sur l'usure en dépouille. Ils ont identifié deux mécanismes principaux d'usure : l'abrasion mécanique, indépendante de la température et liée à la distance de coupe, ainsi qu'un phénomène physico-chimique étroitement lié à la température.

Ils ont démontré qu'au départ, qu'il est possible d'évaluer la longévité de l'outil en se basant sur la température de coupe initiale. Ils ont également proposé des formules analytiques pour modéliser l'usure en dépouille et ont vérifié expérimentalement que dans des conditions normales, cette durée de vie est proportionnelle à $\exp(E/K\theta)$ où E représente l'énergie d'activation, K une constante et θ la température de coupe.

Enfin, ils ont conclu que l'énergie d'activation observée est comparable à celle de la diffusion des métaux lourds et que la température initiale suffit pour prédire la durée de vie de l'outil pour une paire outil-matériau donnée.

Usui et T. Shirakashi [6] Propose une méthode d'analyse visant à anticiper l'érosion des outils de coupe en carbure de tungstène adaptable à divers types d'outils et conditions de coupe lors des opérations de tournage.

Cette méthode repose sur l'exploitation de données provenant de la coupe orthogonale. Ainsi que sur deux constantes caractéristiques de l'usure. Une équation d'usure est dérivée théoriquement et validée par des expériences. De plus, une approche basée sur l'analyse énergétique est conçue pour anticiper la création de copeaux et les charges de coupe, facilitant ainsi l'évaluation des contraintes mécaniques et la température au niveau des zones d'usure.

Les résultats des simulations numériques confirment que Le comportement évolutif de l'usure et l'estimation du temps d'utilisation optimal des outils sont cohérents avec les données expérimentales. Les auteurs soulignent que le système de prédiction analytique, bien qu'efficace, est encore rudimentaire et nécessite des améliorations. Ils notent que les résultats expérimentaux ont été obtenus dans des conditions de laboratoire contrôlées, ce qui limite l'applicabilité pratique de la méthode. Pour renforcer sa validité dans des applications réelles, il est recommandé d'incorporer des estimations statistiques appropriées des résultats prédits.

F. Halila, et al [7] Ont proposé un modèle prédictif destiné à quantifier l'usure par abrasion des outils de coupe qui due à des particules dures et s'accumulent dans les zones de

contact entre l'outil/copeau, ainsi qu'entre l'outil/pièce. Ces particules, supposées de forme conique, sont réparties de manière aléatoire aux interfaces de contact. Le cadre théorique exploite une densité de distribution pour quantifier les variations morphologiques et angulaires des grains abrasifs. Il offre la possibilité d'estimer le volume de matière retiré par abrasion, en intégrant la nature du contact qu'il soit adhérent ou glissant, ainsi que les conditions locales telles que la pression, les contraintes, la vitesse de glissement, le frottement dynamique, etc. Un modèle d'usure a également été intégré pour estimer la durée de vie de l'outil, répondant ainsi aux préoccupations industrielles.

En effet, un modèle analytique a été développé, employant des méthodes mathématiques statistiques pour décrire la variabilité des agents particuliers contribuant à la détérioration de l'outillage. Ce modèle met en évidence l'effet de la vitesse de coupe sur le volume d'usure généré par abrasion, et mobilise la formulation taylorienne de l'usure en vue de modéliser la dépendance entre vitesse opérationnelle et durabilité de l'outil au sein du régime d'usinage investigué.

W. Grzesik et al [8] Ont élaboré une recherche vise à l'étude de dégradation de l'outillage coupant lors du procédé de tournage de finition de l'Inconel 718 alliage structural à dominante nickélique et chromifère. Ils ont testé trois outils revêtus de couches thermiques TiAlN/AlTiN aux rapports stœchiométriques différents, et ont examiné leur aptitude à résister à l'altération selon les critères temporels d'usinage et de volume de matériau débité. Ont modélisé la progression de l'usure à l'aide d'images SME, en s'appuyant sur des investigations poussées par spectroscopie EDX et un contrôle permanent des efforts de coupe ainsi le facteur de friction. Ils ont observé que l'outil A (revêtu de PVD-AlTiN) présentait la meilleure durée de vie, atteignant environ 60 minutes, contre 25 et 15 minutes pour les outils B et C respectivement. Ont ensuite testé l'outil A à différentes vitesses de coupe (80 à 125 m/min) et ont montré que le volume de matière enlevée au seuil d'usure $VBC = 0,2 \text{ mm}$ variait fortement selon la vitesse.

Ont observé que l'usure abrasive restait dominante, mais que des détériorations critiques apparaissaient dans les zones où le revêtement était dégradé. Ont également noté un second mécanisme d'usure qui provoqué par l'accumulation de résidus d'IN718 au niveau de face de coupe, localisée dans une zone de 250 à 400 μm de la frontière du revêtement. Ont conceptualisé l'établissement d'un modèle prédictif de productivité articulé autour de la vitesse d'enlèvement et du volume spécifique de matière usinée.

Pour terminer, ils ont démontré que l'avancée de l'usure est intrinsèquement liée aux changements des contraintes de coupe, spécifiquement la force de réaction, avec un coefficient de friction.

Stahl, J.-E. et al [9] Ont développé une étude physique de la dégradation en face de dépouille des outils de coupe, s'appuyant sur une formulation modifiée de la loi d'usure d'Archard. Ont montré que les résultats issus de ce modèle sont bien corrélés aux diagrammes de Taylor, dans des plages définies de paramètres clés. Ont construit ce modèle à partir de seulement deux essais d'usure, qui représentent des bases de calibration et ont démontré leur efficacité pour quantifier la persistance opérationnelle de l'outillage sous des conditions d'usinage alternatives via l'interpolation ou l'extrapolation des tensions mécaniques et des flux calorifiques.

Ils ont intégré ces sollicitations dans la modélisation pour générer des cartographies d'usure et évaluer la longévité de l'outillage selon la vitesse d'usinage et l'épaisseur nominale de copeaux. Ont estimé une température composite θ_C , incluse dans une fonction d'usure $k_0(\theta_C)$, considérée comme une constante d'Archard dépendante de la température. Ont analysé l'usure en tenant compte de ses origines thermiques, mécaniques, géométriques, ainsi que de la charge linéaire exercée. Ils ont constaté que la précision du modèle est optimale aux points correspondant aux essais expérimentaux.

En conséquence, ils ont démontré que ce modèle grâce à ce modèle il devient possible de détecter et de localiser de manière systématique de nouveaux types d'usures et de simuler les altérations de survie de l'outillage à travers différents benchmarks expérimentaux.

Ils ont mis en évidence que le modèle est particulièrement adapté pour analyser l'impact de divers paramètres sur la longévité de l'outil, en insistant sur le fait que des recherches complémentaires sont nécessaires pour approfondir cette approche.

M.A Yallese et autres [10] Ont piloté une évaluation expérimentale de l'usure d'outillages CBN au cours du tournage industriel d'aciers à densité d'alliages élevée le X200Cr12 trempé à 60 HRC. Cette recherche s'inscrit dans le cadre de l'optimisation des conditions d'usinage en tournage dur. Une première campagne d'essais a été menée afin d'apprécier l'impact de la rapidité d'usinage sur les manifestations d'usure de l'équipement et sa survie opérationnelle. Une seconde séquence d'essais s'est consacrée à l'étude de l'influence de l'usure du tranchant sur l'intégrité de surface des pièces transformées.

Les résultats expérimentaux ont mis en évidence une bonne résistance à l'usure du CBN, même en présence d'un matériau aussi abrasif que l'acier X200Cr12 traité. Il a été observé que,

jusqu'à une vitesse de 240 m/min l'usinage reste stable et la rugosité moyenne (R_a) des surfaces usinées demeure inférieure à 0,85 μm . Un dépassement de cette vitesse critique entraîne une usure accrue de l'outil, conduisant à une instabilité du processus d'usinage matérialisée par des étincelles et des vibrations intenses. Toutefois, même lorsque la valeur limite d'usure admissible ($VB = 0,3 \text{ mm}$) est atteinte la qualité de surface reste acceptable avec une rugosité inférieure à 1,2 μm .

Les travaux ont permis d'identifier l'abrasion comme le principal mécanisme d'usure, provoqué par le détachement de particules de l'outil sous l'action des constituants durs du matériau usiné. À vitesses modérées l'usure progresse lentement jusqu'à l'effondrement du bec de l'outil, tandis qu'à vitesses élevées, cette dégradation se produit rapidement, compromettant la qualité de l'usinage. Il a été conclu que la plage optimale d'utilisation des outils CBN pour ce type d'acier se situe entre 85 et 240 m/min.

Enfin des algorithmes mathématiques ont été implémentés pour calculer la tenue en service de l'outillage, la progression de l'usure et les propriétés rugositives des surfaces façonnées relativement aux conditions de mise en œuvre. Ces modèles se révèlent particulièrement utiles dans un contexte industriel. En effet, ces systèmes autorisent la spécification de paramètres de coupe optimaux et la création de nomogrammes applicatifs pour orienter les choix opératoires en milieu industriel.

I.3 Conclusion

L'ensemble de ces recherches met en évidence que la prédiction de l'usure requiert une considération conjointe des paramètres de coupe, des propriétés thermomécaniques des matériaux et de l'évolution géométrique de l'outil. Cette contribution pose des bases solides pour orienter le choix d'un modèle de modélisation d'usure adapté à une application industrielle, combinant précision, simplicité et potentiel d'universalisation.

CHAPITRE II

GENERALITES SUR L'USINAGE

II.1 Aspects fondamentaux de l'usinage

II.2 Introduction

L'usinage est un procédé de fabrication mécanique qui consiste à façonner une pièce par enlèvement de matière sous forme de copeaux. Son principe repose sur le retrait contrôlé de matière afin de conférer à l'ébauche la forme et les dimensions requises, au moyen d'une machine-outil. Cette technique permet de fabriquer des pièces avec une grande précision [11]. Pendant le processus d'usinage le processus d'enlèvement de matière s'effectue grâce à l'interaction de deux mouvements relatifs entre l'outil/pièce : le mouvement de coupe qui est associé à la vitesse de coupe et le mouvement d'avance correspondant à la vitesse d'avance [12]

On distingue deux méthodes pour réaliser la forme de surface requise : le travail de forme et le travail d'enveloppe.

Dans le premier cas, c'est la forme géométrique de l'arête de coupe qui détermine la forme obtenue.

Dans le deuxième cas, la surface finale est générée par la combinaison du mouvement de coupe et du mouvement d'avance. [11] [12]

II.3 Définition et principes de fondement de l'usinage

L'usinage représente une méthode de fabrication soustractive destinée à éliminer de la matière souvent sous forme de copeaux en utilisant un outil coupant afin de donner à une pièce brute la forme et les dimensions souhaitées. Ce procédé s'appuie sur trois éléments clés

II.3.1 Outil de coupe

L'outil de coupe est défini par une géométrie spécifique tel que les angles de coupe et de dépouille, et est fabriqué à partir de matériaux d'une grande dureté comme le carbure et la céramique ou encore le diamant.

II.3.2 Pièce à usiner

Matériau (métal, plastique, composite) soumis à l'enlèvement de matière.

II.3.3 Mouvement relatif

Les interactions entre l'outil et la pièce sont déterminées via un ensemble de paramètres essentiels comme.

✓ **La vitesse de coupe (V_c)** : c'est la vitesse à laquelle le point de contact entre l'outil et la pièce se déplace, généralement exprimée en mètres par minute (m/min).

✓ **L'avance (f)** : désigne la distance parcourue par l'outil à chaque rotation ou par dent, généralement exprimée en millimètres par tour (mm/tr) ou par dent (mm/dent).

✓ **La profondeur de passe (a_p)** : soit l'épaisseur de matière retirée à chaque passage, mesurée en (mm).

II.4 Les différents procédés d'usinage

II.4.1 Tournage

II.4.1.1 Définition

Le tournage (voir figure II.4-1) est une technique d'usinage par enlèvement de matière, reposant sur l'utilisation d'outils de coupe à arête unique. [13] Cette opération s'effectue à l'aide de machines-outils connues sous le nom de tours (figure II.4-2). [14]



Figure II.4-2: Machine de tournage

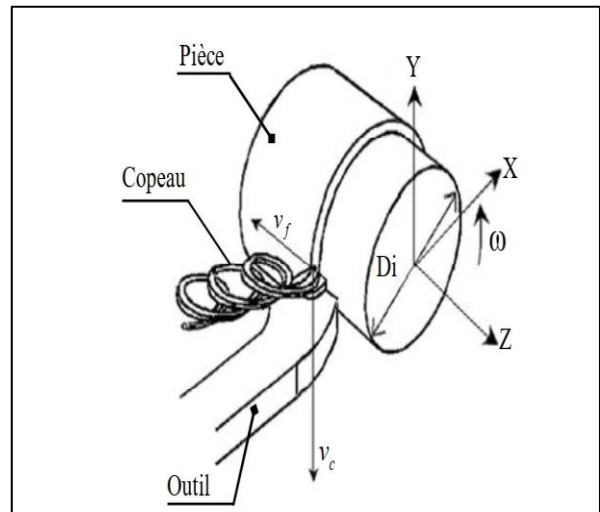


Figure II.4-1: Procédé de tournage

II.4.1.2 Principe de travail

Lors de l'opération de tournage, la pièce effectue une rotation autour de son axe, tandis que l'outil de coupe pénètre la surface à une profondeur définie. Ce dernier se déplace selon un mouvement d'avance continu, qui peut être parallèle ou perpendiculaire à l'axe de rotation pièce [14]

II.4.1.3 Éléments essentiels d'une pièce réalisée par tournage

(La figure II.4-3) présente les éléments principaux qui forment une pièce à usiner, ainsi que les différentes parties composant l'outil de coupe. La surface de la pièce soumise à l'usinage est désignée sous le terme de « surface de la pièce ». Cette surface peut être brute, issue de procédés tels que le moulage, le forgeage ou le laminage, ou bien résulter d'un usinage effectué lors d'opérations antérieures. La « surface engendrée », également appelée surface usinée, désigne la surface finale recherchée, formée par enlèvement progressif de matière au cours de l'usinage avec un outil de coupe. Cette surface est reliée à la surface initiale par une surface

intermédiaire, formée durant le processus par l'arête de coupe, que l'on nomme « surface coupée » [15].

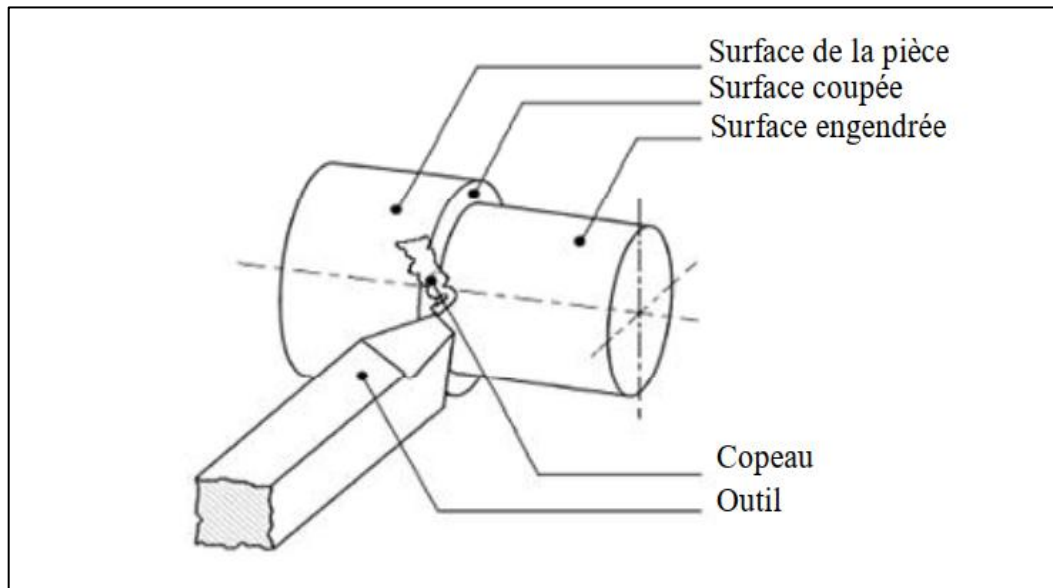


Figure II.4-3 : Mécanisme de coupe des métaux lors de l'opération de tournage [14]

II.4.1.4 Opérations élémentaires en tournage

La figure ci-dessous montre les quatre opérations de base de tournage (figure II.4-4) [13]

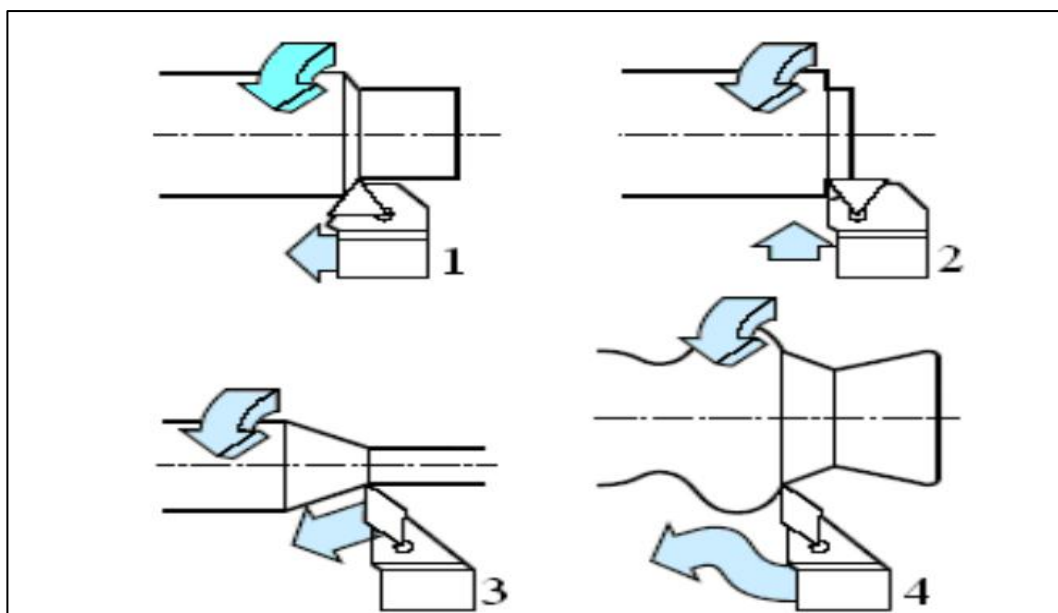


Figure II.4-4 : Opérations fondamentales en tournage

- 1) Chariotage
- 2) Dressage
- 3) Tournage de cônes
- 4) Contournage

Pour une meilleure sélection des outils et des paramètres de coupe, il est préférable de scinder le processus d'usinage des pièces complexes en plusieurs profils de coupe élémentaires décrits précédemment [13].

II.4.1.5 Mouvement relatif outil / pièce

Une analyse détaillée du mécanisme de coupe révèle qu'il repose sur trois mouvements fondamentaux orientés selon des directions mutuellement perpendiculaires (Figure II.4-5) [14].

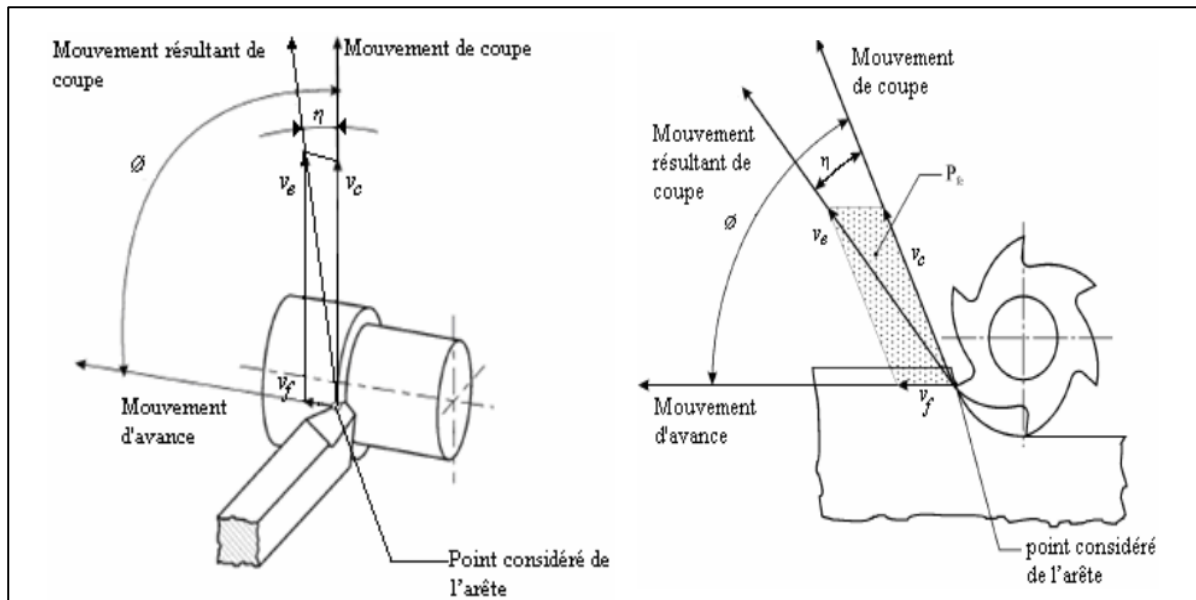


Figure II.4-5 : Mouvements concernant outil / pièce

- Mouvement de coupe. M_c
- Mouvement d'avance. M_a
- Mouvement de pénétration. M_p

II.4.1.6 Paramètres de coupe

Les paramètres intervenant dans l'usinage peuvent être regroupés en deux grandes familles. La première regroupe les grandeurs liées aux déplacements relatifs entre l'outil et la pièce, appelées paramètres cinématiques. La seconde concerne les aspects dimensionnels de l'usinage comme les surépaisseurs de matière à enlever et les dimensions caractéristiques de la passe que l'on désigne par paramètres géométriques (Figure II.4-6). [15]

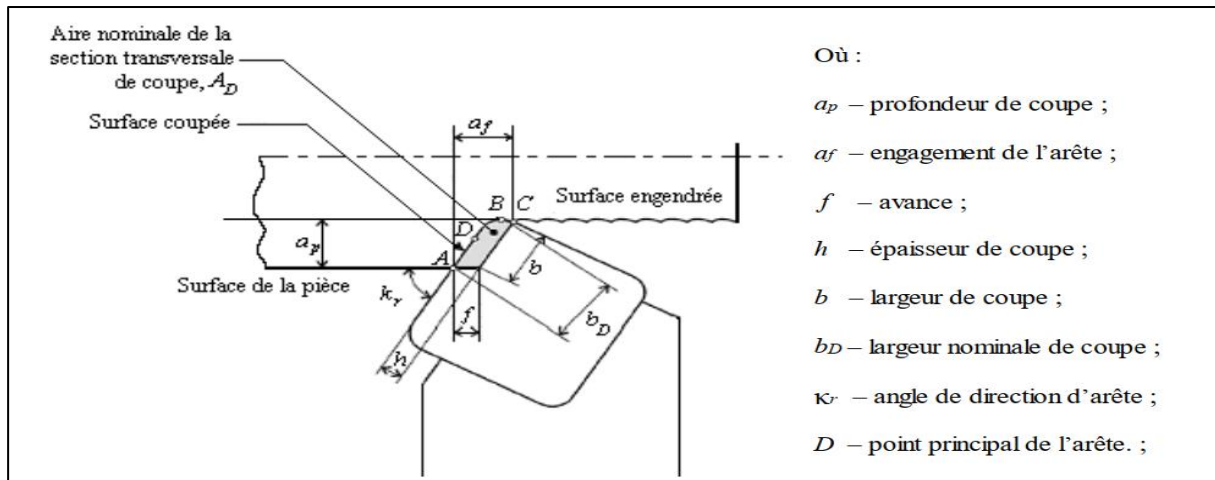


Figure II.4-6 : Configuration de coupe

❖ Vitesse de coupe V_c

La vitesse de coupe représente la vitesse relative, à un temps précis, entre un point sur la face de coupe de l'outil et la surface de la pièce usinée [14] [15].

○ Vitesse linéaire d'un point en rotation

Dans le cas d'un mouvement de coupe circulaire, le calcul de la vitesse de coupe se fait en combinant la vitesse de rotation (N , en tr/min) et le diamètre (D , en mm) de la pièce. En tournage, le diamètre considéré est celui observé à l'endroit le plus éloigné de l'axe de rotation sur le tranchant actif de l'outil.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \text{ [m/min]} \quad (\text{II.4-1})$$

○ Vitesse de coupe en mouvement rectiligne

Lorsque le mouvement de coupe s'effectue selon une trajectoire rectiligne, il est le plus souvent de nature alternative, en raison de l'impossibilité pratique de maintenir un déplacement linéaire continu sur une longue course de travail, la vitesse croît de zéro jusqu'à atteindre une valeur maximale. Les longueurs d'échappée de l'outil (figure II.4-7) sont prévues pour permettre cette accélération. On suppose alors que la vitesse demeure constante tout au long de la course de travail C , ce qui revient à la considérer comme une vitesse moyenne.

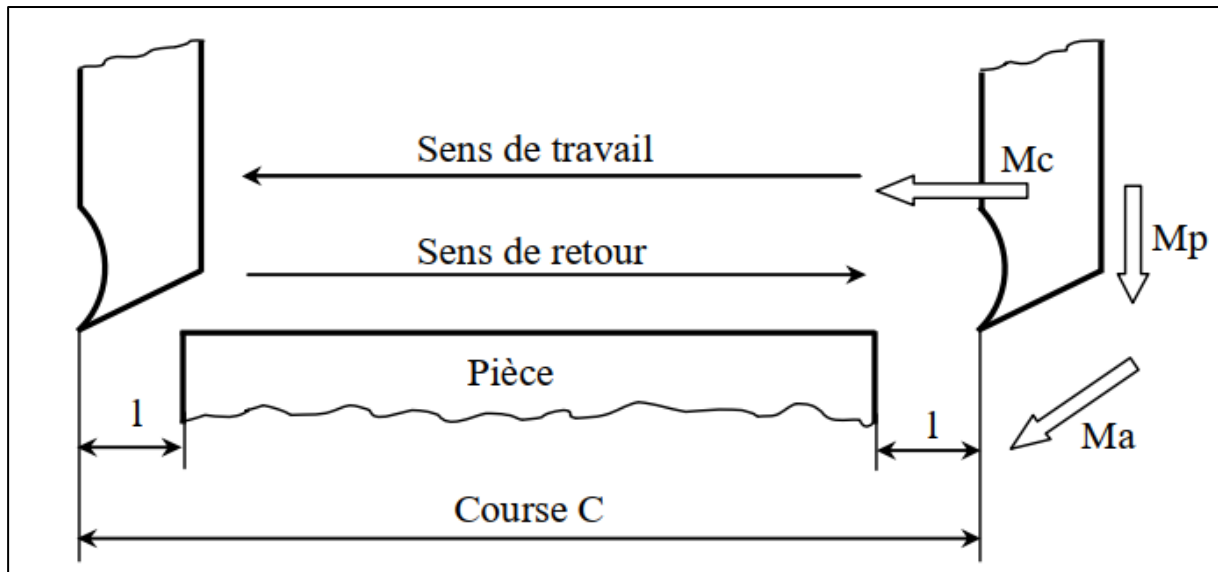


Figure II.4-7 : Mouvement de coupe rectiligne

❖ Vitesse d'avance V_f

La vitesse d'avance V_f signifie la vitesse au moment du déplacement relatif d'un point donné de l'arête de coupe par rapport à la pièce, selon la direction d'avance de l'outil. (Figure II.4-8).

$$V_f = N \times f [\text{mm/min}] \quad (\text{II.4-2})$$

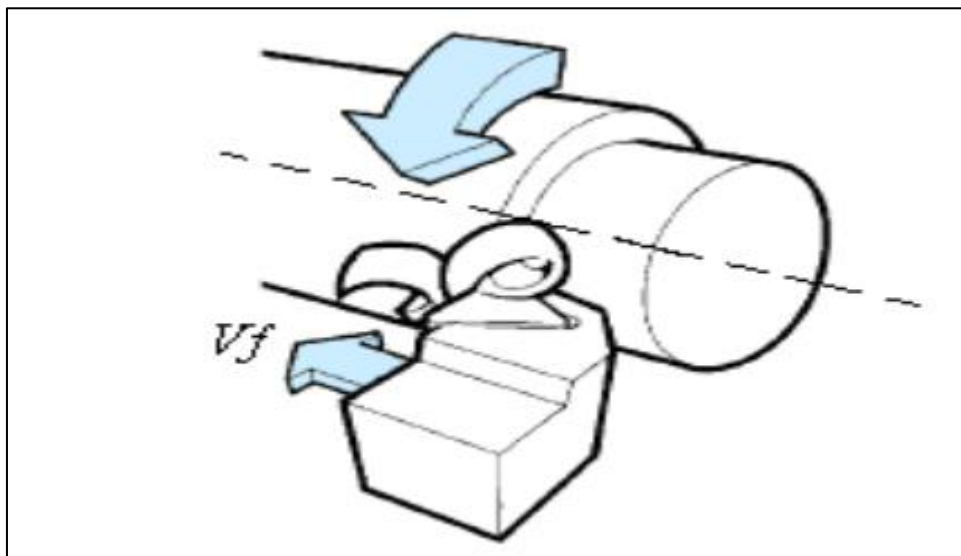
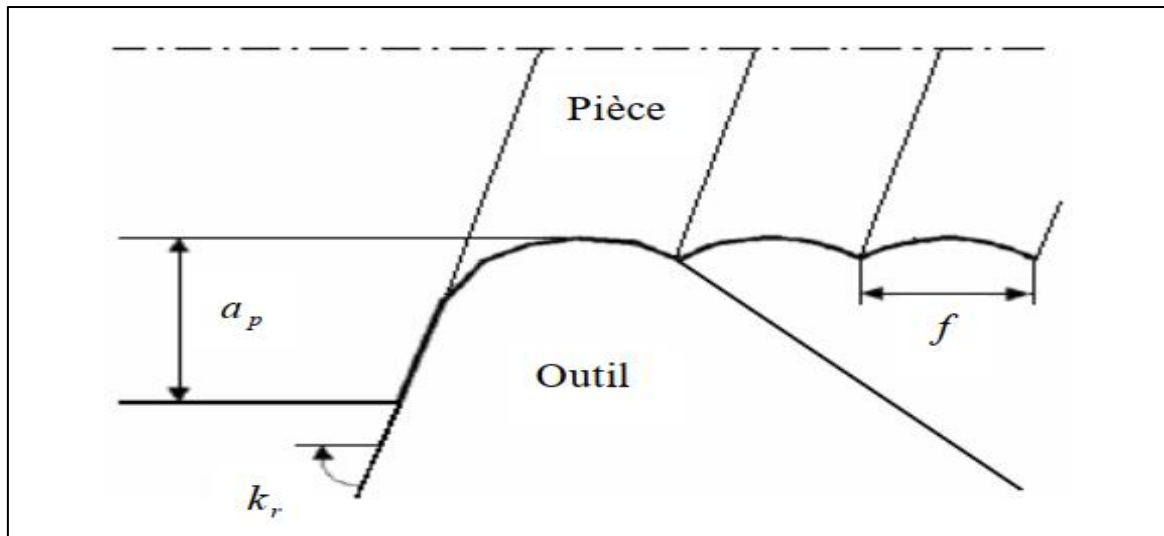


Figure II.4-8 : Mouvement de coupe rectiligne

❖ L'avance par tour f

L'avance f (voir figure II.4-9) correspond à la distance parcourue par l'outil entre deux déplacements successifs, couramment estimée entre deux révolutions de la pièce en usinage, ou entre deux itérations de l'outil dans d'autres méthodes. [16]

Figure II.4-9 : L'avance par tour f

On distingue trois sortes d'avance [14]

- ✓ **Avance longitudinale** : Cela désigne le déplacement de l'outil dans une direction qui suit l'axe de rotation de la pièce
- ✓ **Avance transversale** : Il s'agit du déplacement de l'outil perpendiculairement à l'axe de la pièce brut.
- ✓ **Avance oblique** : Ce terme est utilisé lorsque l'outil se déplace selon un angle par rapport à l'axe de la pièce brut.

II.4.2 Fraisage

II.4.2.1 Définition

Le fraisage est une méthode d'usinage qui consiste à retirer la matière. Ce procédé met en œuvre une fraiseuse (Figure II.4-10) comme machine-outil, et une fraise, un outil de coupe doté de plusieurs arêtes tranchantes. La fraiseuse est spécialement conçue pour l'usinage de surfaces plates et, lorsque la machine est à commande numérique, Adapté à l'usinage de formes complexes, grâce à une coupe généralement assurée par des dents disposées sur la périphérie et/ou l'extrémité d'un outil en forme de disque ou de cylindre. [17].



Figure II.4-10 : Fraiseuse

II.4.2.2 Principe de travail

Lors d'une opération de fraisage, le copeau enlevé résulte de la combinaison de deux mouvements fondamentaux, le premier étant la rotation de l'outil de coupe autour de son axe principal. D'autre part, le déplacement d'avance de la pièce selon trois axes orthogonaux [18].

II.4.2.3 Modes de fraisage

Classé en deux modes principaux selon la surface usinée : le fraisage de (face, profil) [18].

II.4.2.3.1 Fraisage de face

Dans cette technique d'usinage, l'axe de rotation de la fraise est placé en position verticale par rapport au plan de la surface à usiner. (Voir figure II.4-11) Ce procédé, appelé fraisage en bout ou fraisage d'enveloppe, est principalement utilisé pour la production de surfaces planes.

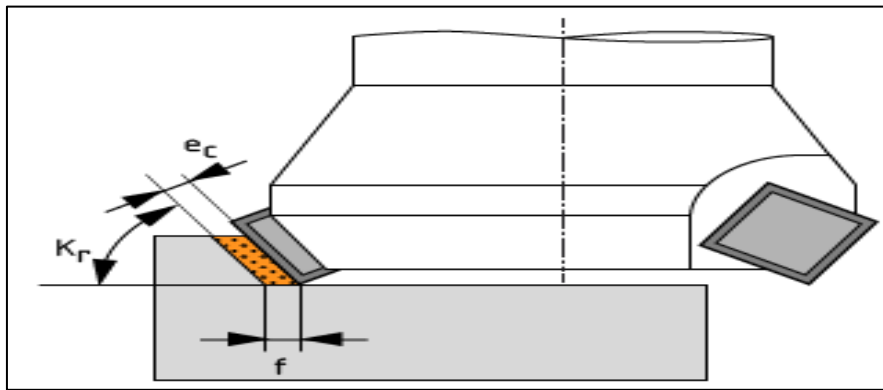


Figure II.4-11 : Opération fraisage de face

II.4.2.3.2 Fraisage de profil

Dans ce mode d'usinage, la génératrice de la fraise est parallèle à la surface travaillée. Il permet l'obtention de surfaces planes ou de formes variées, dans différentes orientations. On appelle aussi cette méthode de fraisage, le fraisage en roulant. Pendant le fraisage de profil, la direction relative de rotation de l'outil en comparaison au mouvement de la pièce permet d'identifier deux méthodes possibles.[19]

a. Fraisage en opposition : Se caractérise par un déplacement de la pièce à l'encontre du sens de rotation de l'outil dans la zone de coupe. Lors du procédé, l'épaisseur du copeau s'accroît sans cesse (voir figure II.4-12).

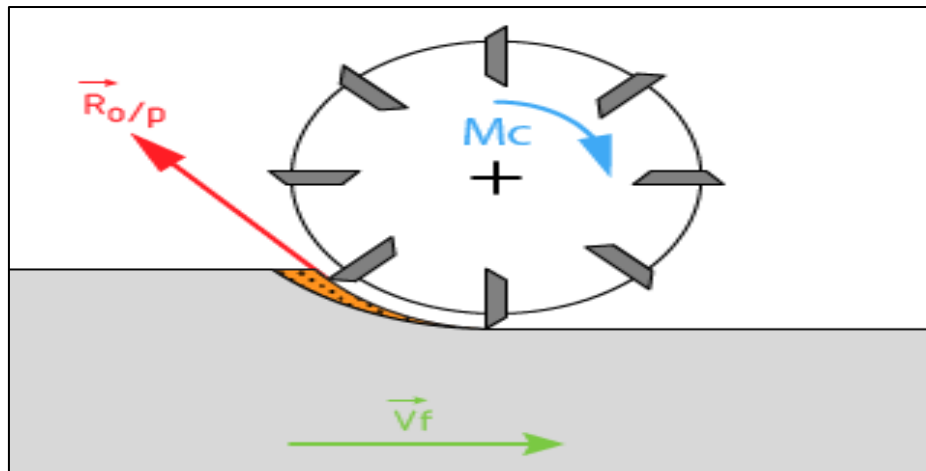


Figure II.4-12 : Opération de fraisage en opposition

b. Fraisage en concordance, aussi appelé "en avalant" : Dans ce procédé, la pièce se déplace dans la même direction que celle de l'outil en rotation. Par conséquent, l'épaisseur du copeau diminue progressivement au cours de la coupe, jusqu'à devenir nulle en fin de passe. (Figure II.4-13).

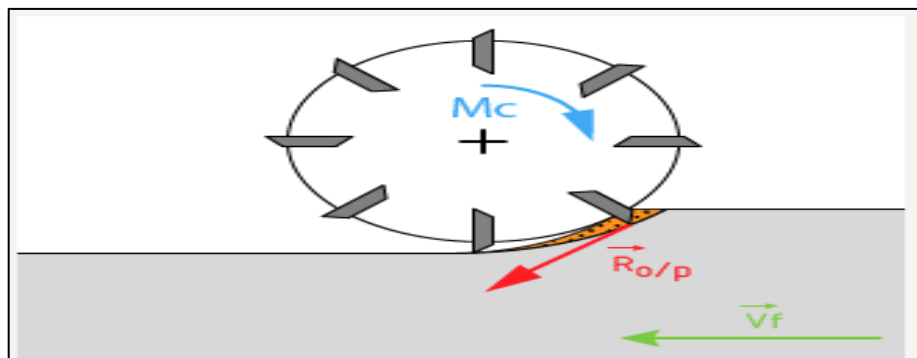


Figure II.4-13 : Opération de fraisage en concordance

On peut également effectuer un fraisage combiné, c'est-à-dire de face et de profile en même temps.

II.4.3 Perçage

II.4.3.1 Définition

Le terme "perçage" (Figure II.4-14) désigne l'ensemble des procédés visant à créer des trous de forme cylindrique dans une pièce, en retirant de la matière à l'aide d'outils coupants. Il contient non seulement le perçage de trous courts et le forage de trous profonds, mais aussi diverses opérations d'usinage associées, comme le filetage, l'alésage, ainsi que des tâches de finition telles que le calibrage et le galetage. [20].



Figure II.4-14 : Perçage



Figure II.4-15 : Perceuse

II.4.3.2 Principe de travail

Lors du perçage, la matière est retirée sous forme de copeaux grâce à l'action conjointe d'un mouvement rotatif de l'outil et d'un déplacement linéaire selon l'axe de perçage. Pour le perçage de trous courts sur les machines conventionnelles (Figure II.4-15), ce double mouvement de rotation et d'avance est donné à l'outil. L'utilisation croissante des tours universels à commande numérique (CN) et à commande numérique par ordinateur (CNC) a conduit à une intégration fréquente d'une pièce en rotation avec un foret fixe. Cette combinaison permet d'optimiser les processus d'usinage en améliorant la précision et l'efficacité des opérations.

II.4.4 Rabotage

II.4.4.1 Définition

Le rabotage (Figure II.4-16) est une opération d'usinage visant à retirer de la matière sous forme de copeaux. Cette opération est effectuée à l'aide de raboteuses ou d'étaux limeurs machines-outils spécialement conçues pour l'emploi d'outils d'enveloppe assurant l'usinage par succession de passes rectilignes. [21].

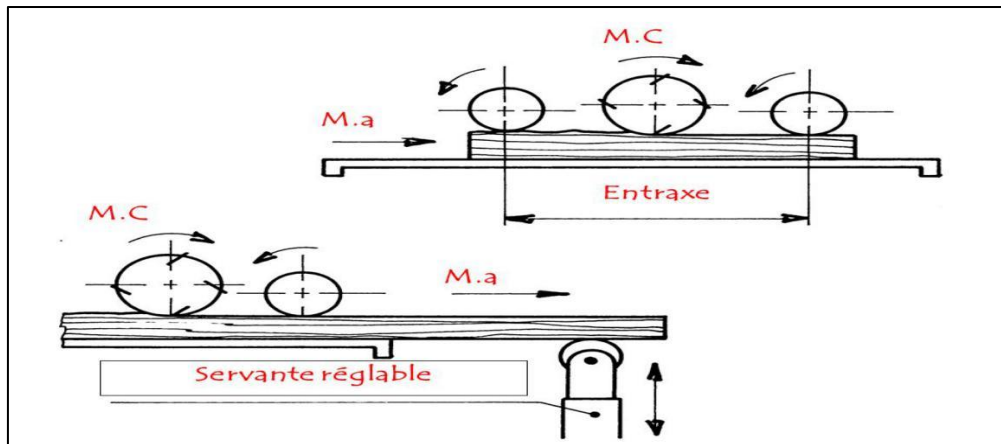


Figure II.4-16 : Rabotage

II.4.4.2 Principe de travail

En rabotage, le mouvement rectiligne d'usinage peut être assuré soit par la pièce, soit par l'outil. Dans le cas d'une raboteuse, c'est la pièce qui se déplace tandis que l'outil effectue un déplacement latéral déterminé. À l'inverse, sur un étai limageur c'est l'outil qui réalise un va-et-vient rectiligne revenant à sa position initiale après chaque passe pendant que la pièce avance latéralement selon l'incrément souhaité [14].

II.5 Paramètres et critères influençant la qualité d'usinage

De nombreux facteurs influencent la stabilité et la précision pendant l'usinage :

Dureté et cinématique de la machine : La dureté et la stabilité de la machine-outil déterminent sa capacité à exécuter des mouvements précis pendant l'usinage. Une machine manquant de rigidité peut générer des vibrations indésirables, entraînant des coupes imprécises. La cinématique, c'est-à-dire la manière dont les mouvements axiaux sont réalisés, joue également un rôle crucial. Par exemple, une machine dotée d'un seul axe avec une broche fixe peut offrir une meilleure stabilité qu'un modèle équipé d'une broche capable de se déplacer selon deux axes [22].

Outils de coupe : la performance et l'état des outils utilisés en usinage influencent fortement la stabilité et la précision du processus. L'utilisation d'outils émoussés ou détériorés Ces irrégularités provoquent des changements dans les efforts de coupe, ce qui provoque une mauvaise qualité de finition de la surface usinée et une médiocre précision dimensionnelle.

Paramètres de coupe : Les paramètres de coupe en usinage présentent l'ensemble des variables technologiques qui définissent les conditions de réalisation d'une opération d'enlèvement de matière. Ils sont principalement la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la

profondeur de passe et, dans certains cas, l'angle de coupe. Ces paramètres influencent directement la productivité, la qualité de la pièce usinée et l'usure de l'outil.

Matériau de la pièce à usiner : La nature du matériau usiné a une influence directe sur la stabilité et la précision du procédé d'usinage. Certains matériaux complexes à usiner, comme le titane ou l'acier trempé, demandent des efforts de coupe intenses et une stabilité renforcée de la machine, dans le but d'assurer une précision maximale du processus.

Serrage et maintien de la pièce à usiner : Pendant l'usinage, la fixation adéquate de la pièce sur la machine est essentielle pour garantir la stabilité et la précision.

Globalement : l'obtention de la précision requises en usinage nécessite une analyse rigoureuse de chacun de ces facteurs ainsi que de leurs interactions. L'intervention d'opérateurs expérimentés, combinée à une planification soignée, contribue significativement à garantir un haut niveau de qualité et de précision dans l'usinage [22].

II.6 Outils coupants

II.6.1 Introduction aux outils coupants

Les outils coupants sont des dispositifs mécaniques conçus pour usiner la matière par enlèvement, sous forme de copeaux [23]. Il existe une très grande variété d'outils de coupe différents types de géométries de matériaux et de revêtements.

Quel que soit leur usage ou leur apparence extérieure, tous les outils coupants possèdent une partie active, c'est-à-dire la zone directement impliquée dans l'enlèvement du copeau. Quelle que soit la géométrie de l'outil, cette partie active présente une configuration fonctionnelle similaire à celle d'un outil de tournage classique.

On exige de l'outil d'avoir les propriétés suivantes [14] :

- ✓ Pression d'exécution de la forme de la pièce à usiner.
- ✓ Précision des cotes à usiner.
- ✓ État de surface de la pièce à usiner.
- ✓ Efficacité influente sur le rendement du travail.
- ✓ Solidité (stabilité).
- ✓ Prix de revient bas.

II.6.2 Eléments de l'outil coupant [24]

II.6.2.1 Faces et arêtes de l'outil coupant

Les surfaces actives qui entrent en contact avec le matériau à usiner sont désignent par les faces de l'outil coupant. Ces surfaces sont essentielles pour le processus de coupe car elles déterminent l'efficacité de l'usinage et influencent la formation des copeaux.

Les faces peuvent être planes convexes ou concaves selon le type d'outil et l'application.

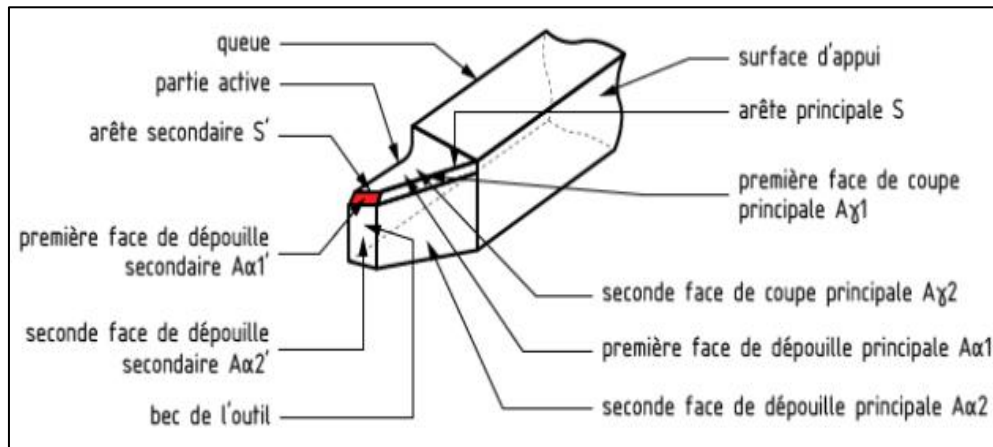


Figure II.6-1 : Arêtes et parties actives d'un outil de tournage

II.6.2.2 Angles de l'outil coupant

L'analyse des phénomènes liés à l'enlèvement de matière à l'aide d'un outil coupant met en évidence plusieurs angles caractéristiques de l'outil (Figure II.6-2). On distingue principalement.

- ✓ Angle de dépouille α : influence le frottement entre l'outil et la pièce, ce qui a un effet direct sur la longévité de l'outil.
- ✓ Angle de taillant β : conditionne la résistance du tranchant à la rupture.
- ✓ Angle de coupe γ : agit sur les efforts de coupe, la consommation d'énergie ainsi que la dissipation thermique. La relation $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$ demeure constante.

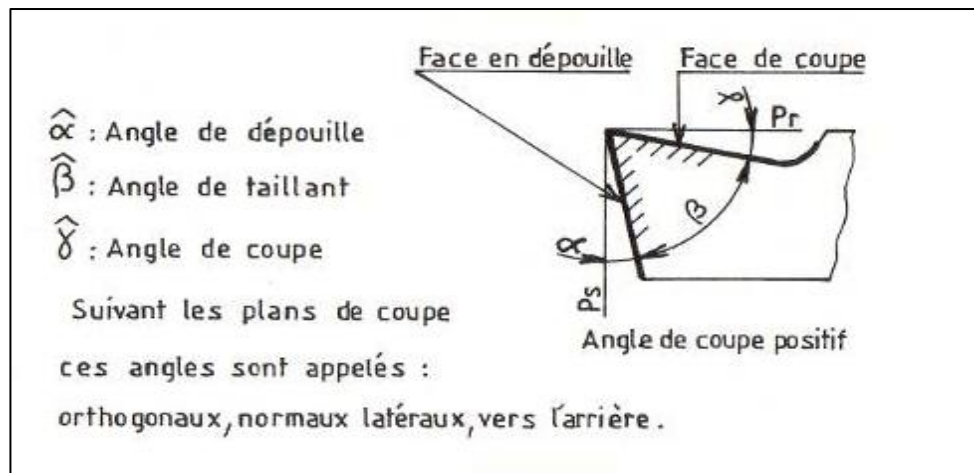


Figure II.6-2 : Angles de l'outil

II.6.3 Cinématique de l'outil de coupe

II.6.3.1 Paramètres de coupe

En fabrication mécanique, trois paramètres fondamentaux contrôlent le processus d'enlèvement de matière et influencent fortement les mécanismes d'usure des outils de coupe. Il s'agit de.

❖ **Vitesse de coupe V_c** : paramètre fondamental dans les opérations d'usinage, définie comme la vitesse à laquelle le matériau est retiré de la pièce par l'outil de coupe. Elle est généralement exprimée en mètres par minute (m/min) ou en pieds par minute (ft/min)

❖ **Avance par tour f** : est un paramètre essentiel dans les opérations d'usinage, notamment lors du tournage et du fraisage. Représente la distance que l'outil de coupe parcourt le long de la pièce à usiner pour chaque rotation complète de celle-ci. Généralement exprimée en millimètres par tour (mm/tr) ou en pouces par tour (in/tr).

❖ **Profondeur de passe a_p** : s'agit de la profondeur de pénétration de l'arête de coupe dans la matière. En chariotage, elle correspond à la différence de rayon de la pièce entre deux passes, tandis qu'en coupe orthogonale, elle équivaut à l'épaisseur du disque usiné.

II.6.3.2 Mouvements de l'outil coupant

Pour retirer la quantité désirée de matière, l'outil est équipé de deux mouvements.

- **Mouvement de coupe** : Le mouvement effectué par l'outil de coupe qui pénètre dans le matériau de la pièce, permettant ainsi l'enlèvement de matière.
- **Mouvement d'avance** : Se réfère au mouvement de l'outil à travers la pièce et sa cadence est déterminée par la vitesse d'avance V_f .

II.6.4 Différents types d'outils de coupe et leurs applications

L'outil de coupe est la pièce maîtresse chargée d'enlever la matière lors de l'usinage, il en existe une grande diversité tant par leurs géométries que par les matériaux et revêtements utilisés.

Les outils ont connu une évolution importante où l'industrie est passée de l'outil monobloc en acier rapide à l'outil à plaquettes carbures rapportées évitant ainsi les réaffutages nombreux et coûteux (Figure 0.6-3). Actuellement, ce sont les plaquettes en carbure revêtues qui dominent le marché.

II.6.4.1 Outils de tournage



Figure II.6-3 : Outils de tournage

II.6.4.2 Opérations d'usines en tournage

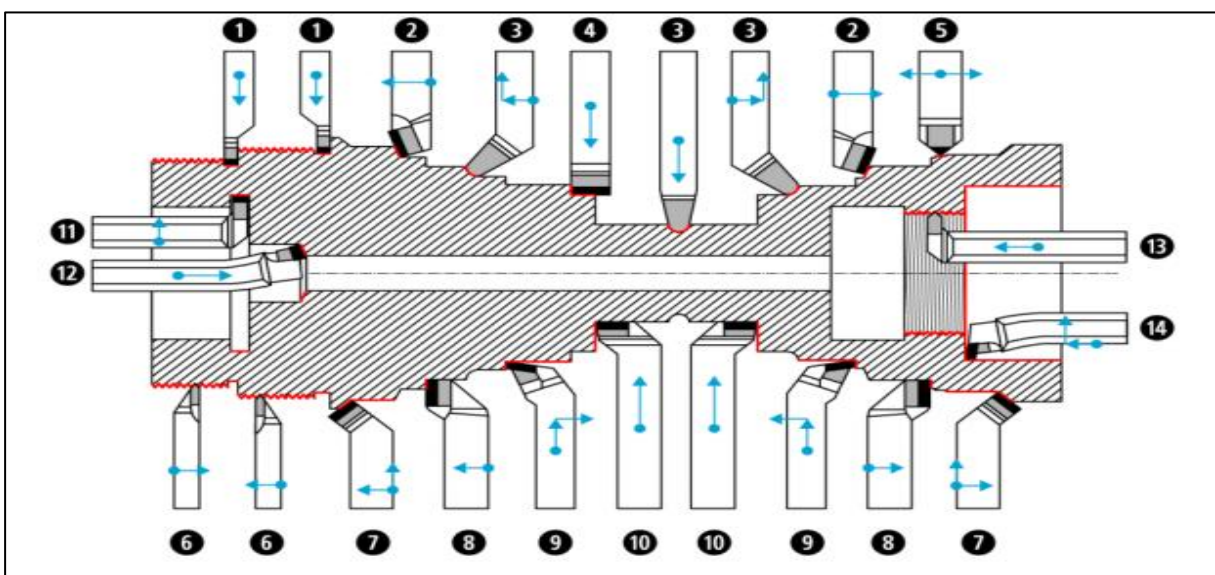


Figure II.6-4 : Opérations de tournage

Tableau II.6-1: Opérations de tournage

1. Dressage	8. Dressage d'épaulement
2. Chanfreinage	9. Cylindrage
3. Perçage	10. Rainurage
4. Alésage	11. Alésage d'épaulement
5. Filetage intérieur	12. Alésage long / Traversant
6. Filetage extérieur	13. Taraudage
7. Chanfreinage extérieure	14. Chanfrein intérieur

II.6.4.3 Outils et opérations de fraisage



Figure II.6-5 : Outils de fraisage

II.6.4.4 Opérations d'usinages en fraisage

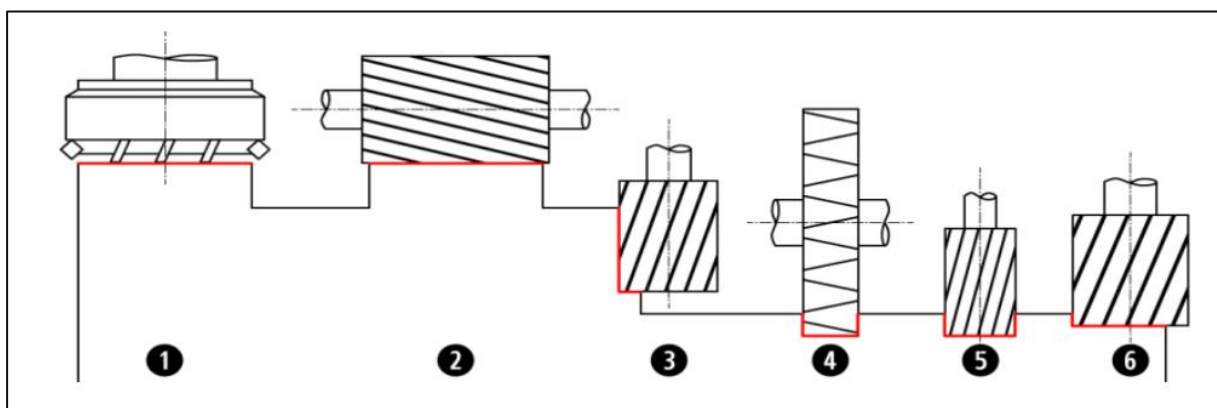


Figure II.6-6 : Opérations d'usinages en fraisage

Tableau II.6-2 : Opérations d'usinages en fraisage

1. Surfaçage de face.	4. Rainurage 3 tailles.
2. Surfaçage de profil.	5. Rainurage 2 tailles.
3. Surfaçage - dressage prédominant profil.	6. Surfaçage - dressage prédominant face.

II.6.5 Matériaux et propriétés des outils de coupe

II.6.5.1 Outils en aciers rapides

Ces aciers sont fortement alliés en carbone (de 0,7 à 1,6 %) et en tungstène. Pour améliorer les propriétés de ces matériaux, d'autres éléments d'alliage tels que le chrome (Cr) et le cobalt (Co) sont également ajoutés. La dureté des outils en acier rapide se situe généralement entre 700 et 1000 HV. Ces matériaux sont couramment employés pour les opérations de perçage, en raison des contraintes liées à l'évacuation des copeaux à l'intérieur du trou, mais ils sont nettement moins utilisés en tournage. [25]

II.6.5.2 Outils en carbures de tungstène

Cette catégorie comprend des alliages constitués majoritairement de tungstène (60 à 90 %), associés à du titane et du tantale (1 à 35 %), ainsi qu'à du cobalt ou du nickel (5 à 15 %), auxquels s'ajoutent parfois de faibles proportions de molybdène ou de vanadium. Le métal dur est obtenu par un procédé de frittage, et sert principalement à fabriquer des plaquettes fixées sur le corps de l'outil par brasage, vissage ou bridage. Certains outils de petite taille sont entièrement confectionnés en métal dur Outils en céramiques.

Ce sont des matériaux frittés sans aucun liant métallique. Ils sont très durs et donc sensibles aux chocs thermiques et/ou mécaniques. La céramique la plus courante est celle constituée d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3). Il existe d'autres types de céramiques qui sont également employés dans le cas des alliages à faible usinabilité ; les céramiques noires qui sont mélangées au Al_2O_3 et au carbure métallique TiC , WC ou à la zircone ZrO_2 et le nitrure de silicium Si_3N_4 [25].

II.6.5.3 Plaquettes de coupe

Une plaquette de coupe moderne comporte deux parties distinctes, conçues pour améliorer les performances et prolonger la durée de vie de l'outil.

Un substrat, chargé de supporter les efforts mécaniques et les contraintes thermiques liés à l'usinage, grâce à sa résistance à la pression, à la flexion et à sa bonne ténacité.

Les principales matières utilisées pour les outils de tournage modernes sont les suivantes :

- Carbures revêtus (GC).
- Carbures non revêtus (C).

- Cermets (CT).
- Céramiques (CC).
- Nitrures de bore cubiques (CB).
- Diamants poly cristallins (CD).

Les carbures non revêtus (C) sont produits par frittage, un procédé de métallurgie des poudres qui combine des matériaux durs tels que les carbures de tungstène ou de titane avec un liant, généralement du cobalt, apportant ainsi la ténacité requise à la plaquette.

II.6.6 Choix du matériau de l'outil de coupe

Le graphique Figure II.6-7 permet d'identifier les différents matériaux d'outils utilisés selon les domaines d'application. Il représente les conditions d'usinage standards, notamment en ébauche pour le travail des aciers et des fontes. Toutefois, il ne peut servir à déterminer les paramètres de coupe appropriés [26].

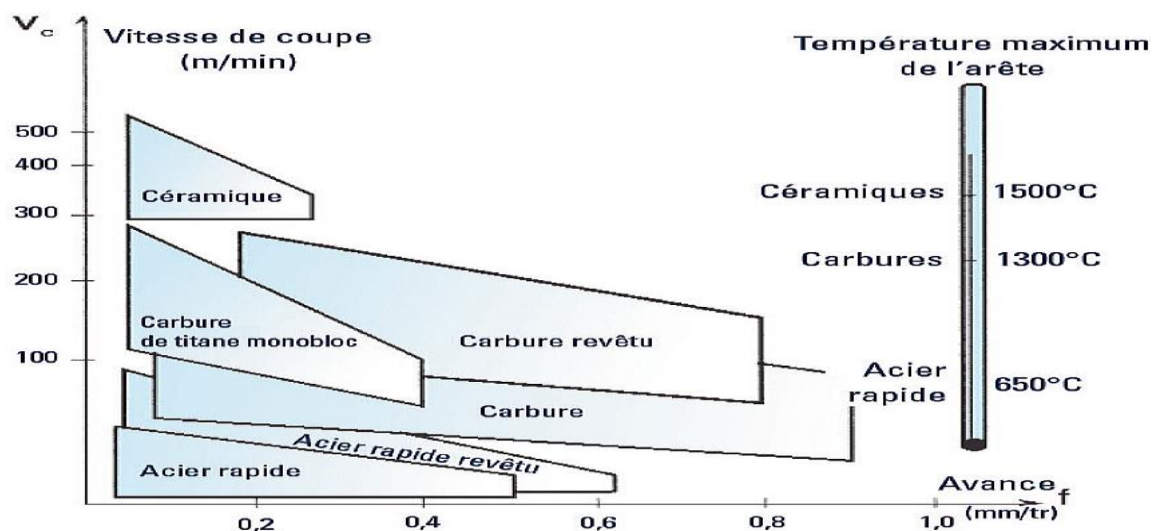


Figure II.6-7: Choix du matériau des outils des coupes

II.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté les principes fondamentaux de l'usinage, notamment les procédés tels que le tournage, le fraisage et le perçage, ainsi que leurs paramètres clés, notamment la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe. Il a également abordé les outils de coupe modernes, leurs géométries et les matériaux utilisés. (Carbures, céramiques) ont été expliqués, soulignant leur impact sur la qualité d'usinage. Les critères influençant la performance, tels que la rigidité machine et les conditions de coupe, ont été analysés. Ces concepts théoriques établissent le cadre nécessaire pour comprendre les mécanismes d'usure abordés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III
MECANISMES D'USURE
DES OUTILS ET
METHODES DE MODELISATION

III.1 Mécanismes d'usure des outils

III.1.1 Définition de l'usure

En fabrication mécanique l'usure des outils résulte de l'action de plusieurs mécanismes tel que mécaniques et chimiques ou physiques et qui se manifester sous diverses formes sur la plaquette [24].

L'outil est inévitablement soumis à l'usure, tant qu'il reste en contact et en mouvement avec la pièce. Cela peut fréquemment se traduire par une détérioration du matériau de l'outil d'où la nécessité de savoir quand il est temps de remplacer l'outil ou le fil.

La (figure III.1-1) Représente l'évolution de l'usure en fonction du temps de travail de l'outil, on distingue trois (03) zones de fonctionnements qui peuvent être identifiées comme suite : [27]

- ✓ **Zone I** : Phase d'adaptation et de rodage de l'arête au régime de coupe : usure rapide.
- ✓ **Zone II** : Phase d'usure quasi-stationnaire à évolution linéaire.
- ✓ **Zone III** : Phase de l'accroissement rapide de l'usure, l'effondrement de l'arête est à prédire.

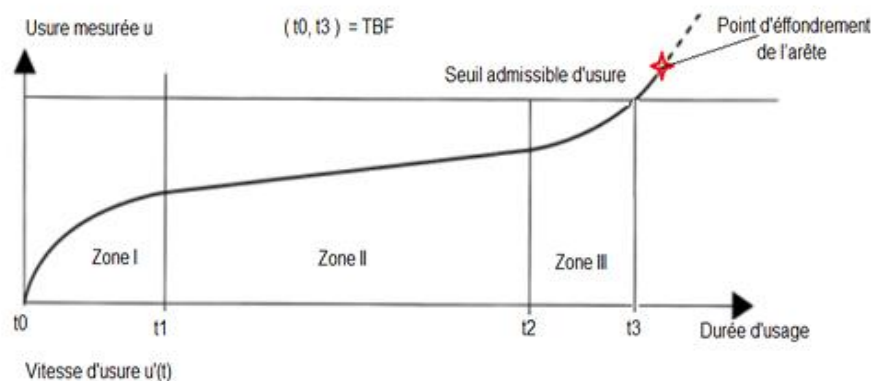


Figure III.1-1 : Evolution de l'usure dans le temps

III.1.2 Formes d'usures d'outil

III.1.2.1 Usure en cratère

L'écoulement des copeaux sur la face de coupe de l'outil entraîne un frottement intense et la formation d'un cratère à sa surface. Ce phénomène d'usure est couramment appelé usure en cratère (Figure III.1-2) et est généralement lié à des processus d'abrasion ou à des mécanismes physico-chimiques, en raison des températures élevées générées lors des opérations d'usinage. [28]

Ce type d'usure peut entraîner une augmentation de l'angle de coupe et une réduction de la force de coupe, tout en affaiblissant l'arête de coupe. La détérioration, voire la rupture de

l'arête, a des conséquences préjudiciables sur la qualité de la surface. La profondeur du cratère, désignée par KT , représente le paramètre prédominant pour évaluer l'usure en cratère [24].



Figure III.1-2 : Forme d'usure en cratère

III.1.2.2 Usure en dépouille

Cette forme d'usure apparaît sur la face de dépouille principale de l'outil, qui est en contact avec la pièce fraîchement usinée et résulte essentiellement de l'usure par abrasion et par adhésion de l'arête de l'outil de coupe contre la surface de la pièce usinée.

L'effet de l'usure sur la dépouille est significatif sur les efforts de coupe, ce qui peut entraîner une mauvaise qualité de surface ou des dimensions hors tolérances. Elle se caractérise par la largeur moyenne du cratère (VB), utilisée comme critère pour estimer la durée de vie d'un outil de coupe [24].



Figure III.1-3 : Zone d'usure en dépouille de l'outil

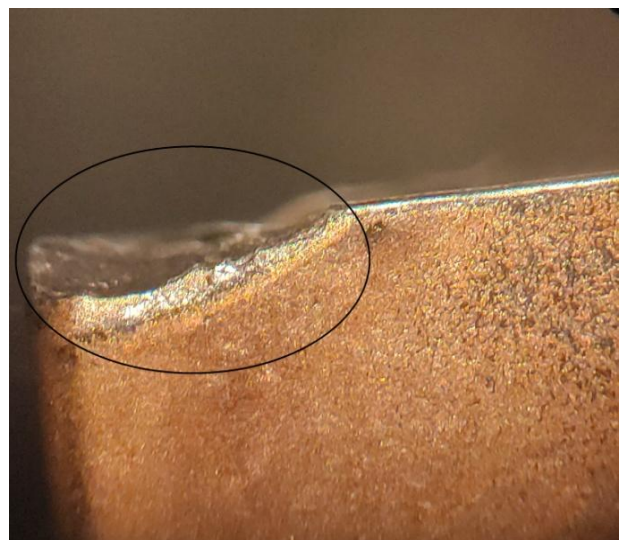


Figure III.1-4 : Zone d'usure en dépouille de l'outil en face

III.1.3 Modes d'usure en usinage

Plusieurs modes d'usure peuvent se produire à la fois, notamment : l'usure mécanique (causée par l'abrasion et l'adhérence), l'usure thermomécanique (causée par la fatigue), l'usure thermochimique (causée par la diffusion) et l'usure électrochimique (causée par l'oxydation). (Figure III.1-4) montre comment les types d'usure et leur intensité variant avec la température d'usinage.

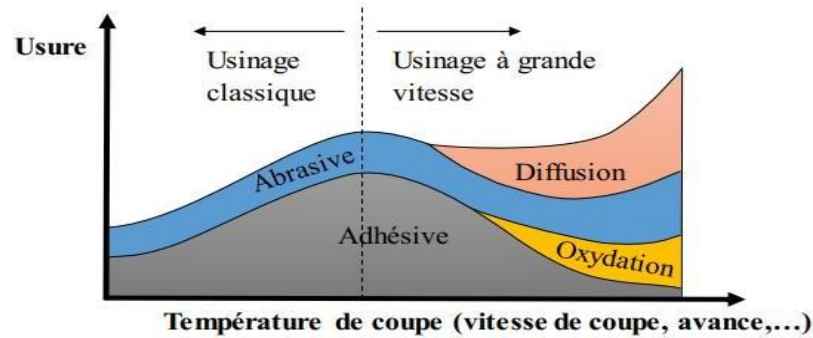


Figure III.1-5 : Classification des modes de l'usure en fonction des paramètres d'usinage

III.1.3.1 Usure par abrasion

Ce mécanisme est provoqué par des particules abrasives dures qui se retrouvent piégées à l'interface de contact entre l'outil et la pièce. L'abrasion est un phénomène mécanique qui génère l'écaillage de la surface de l'outil.

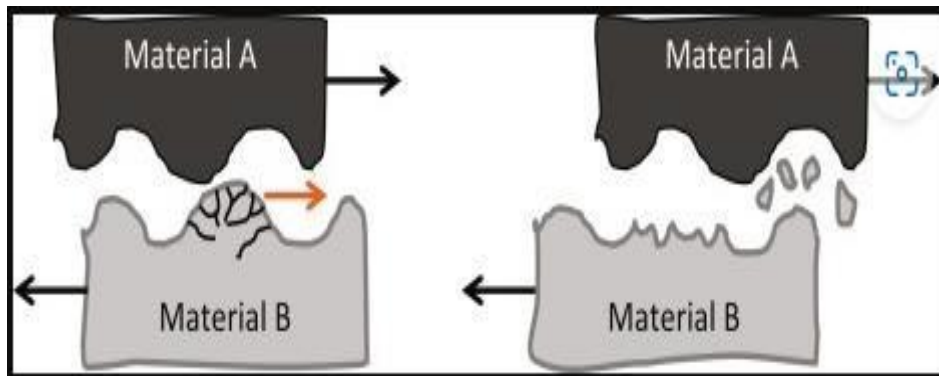


Figure III.1-6 : Usure par abrasion

III.1.3.2 Usure par adhésion

Phénomène physico-chimique, l'usure par adhésion survient lorsque le contact glissant entre l'outil et la pièce (ou le copeau) engendre le cisaillement des aspérités en raison d'une forte liaison adhésive (voir Figure III.1-6). La perte de matière de l'outil se produit lorsque la liaison interne de son matériau ne suffit plus à résister aux sollicitations mécaniques à l'interface de contact avec la pièce [29].

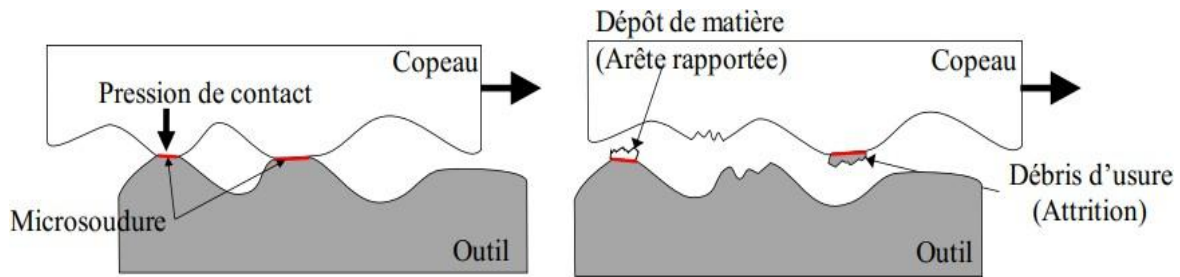


Figure III.1-7 : Usure par adhésion

III.1.3.3 Usure par diffusion

Ce type d'usure résulte d'un transfert atomique par diffusion chimique entre l'outil et la pièce durant le processus d'usinage (Figure III.1-7). Ce phénomène a été décrit pour la première fois par Loladze [30], qui a montré qu'à vitesse de coupe ordinaire, l'usure de l'outil est principalement due à des phénomènes d'abrasion et d'adhésion ; toutefois, à des vitesses de coupe plus élevées, les mécanismes de diffusion deviennent principaux.

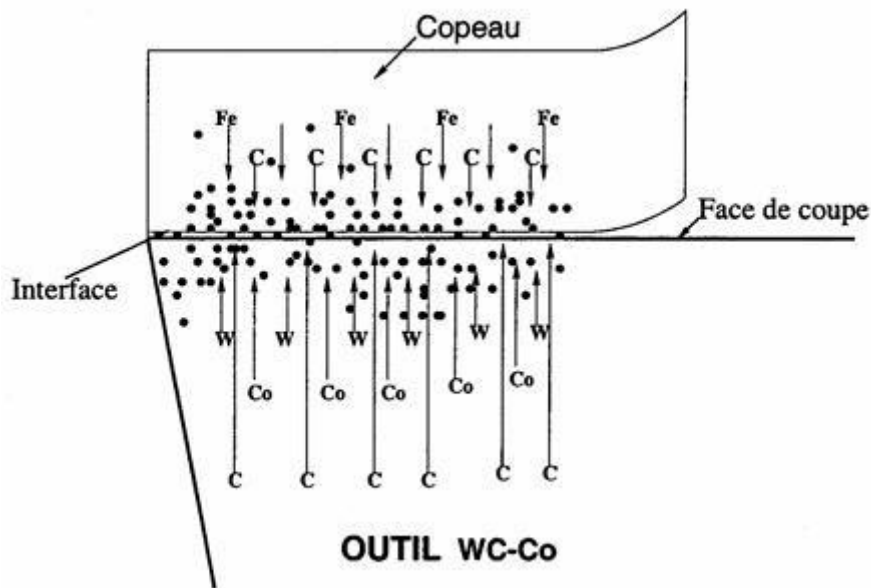


Figure III.1-8 : Usure par diffusion

III.1.4 Prédiction de l'usure des outils de coupe

Plusieurs chercheurs ont développé des modèles pour prédire l'usure des outils, liée à des mécanismes tels que l'usure adhésive, abrasive et par diffusion. Parmi ces travaux, le modèle développé par Usui et ses collègues. Est l'un des plus reconnus.

Reposant sur la mécanique de coupe (zone de cisaillement) Usui a proposé un modèle permettant de prédire l'usure des outils en carbure lors de l'usinage de l'acier. Il intègre des hypothèses sur l'adoucissement thermique des carbures et s'appuie sur des études antérieures.

Le modèle repose sur une équation différentielle :

$$dv = C_1 q \exp\left[-\frac{C_2}{\theta}\right] dL_s \quad (\text{III-1})$$

- q : est la contrainte normale au point considéré
- θ : est la température inter faciale
- C_1 et C_2 : sont des constantes empiriques
- C_1 : est proportionnel à la dureté de l'outil

III.1.5 Solutions haute technologie pour protéger vos outils contre l'usure

• Revêtements haute résistance

(ex : TiN, TiAlN) - Couches ultra-dures réduisant friction et échauffement.

• Traitements de surface

(Nitruration, texturation laser) - Augmentent la dureté et limitent l'adhésion.

• Outils connectés

(Capteurs RFID, thermiques) - Surveillent l'usure en temps réel pour anticiper les changements.

• Refroidissement intelligent

(Cryogénie, MQL) - Systèmes de lubrification/refroidissement optimisés pour moins d'échauffement.

• Nouveaux matériaux

(Céramiques, carbures renforcés) - Plus résistants à l'abrasion et aux chocs thermiques.

• Technologies futures

(Revêtements auto-réparant, IA prédictive) - Solutions autonomes pour prolonger la durée de vie.

III.1.6 Conclusion

La protection des outils a connu une révolution grâce aux revêtements high-tech, traitements innovants et outils connectés. Ces avancées permettent de multiplier par 2 ou 3 leur durée de vie, tandis que l'IA et le monitoring intelligent offrent une maintenance prédictive révolutionnaire. Une nouvelle ère s'ouvre pour l'usinage, où l'usure n'est plus une fatalité mais un paramètre maîtrisable.

III.2 Méthodes de modélisation

III.2.1 Modèles empiriques d'usure (Loi d'usure)

La loi d'usure relie la durée de vie de l'outil aux conditions géométriques et aux paramètres de coupe utilisés durant l'usinage.

La durée de vie effective T correspond au temps d'usinage nécessaire pour atteindre le seuil d'usure critique, déterminé selon les critères précédemment établis. Plusieurs modèles mathématiques ont été développés afin de décrire l'évolution de l'usure des outils de coupe. Parmi ceux-ci, on peut citer notamment [31].

III.2.1.1 Loi de Taylor

Le modèle de Taylor (III.2-1) est l'approche empirique la plus couramment utilisée dans les applications industrielles, en particulier selon les normes ISO 3685 pour le tournage et ISO 8688 pour le fraisage. Ce modèle permet de prédire la durée de vie de l'outil en fonction de divers paramètres de coupe, une fois que les coefficients n et C (qui sont des paramètres constants liés au matériau usé et au couple outil/matière, respectivement) ont été déterminés. Toutefois, il ne fournit pas une mesure précise de l'usure (volume usé) sur une période de coupe donnée.

$$T = C \cdot V^n \quad (\text{III.2-1})$$

V : La vitesse de coupe.

T : La durée de Vie.

n : Exposant de Taylor.

C : Constante dépendant du couple (outil/pièce).

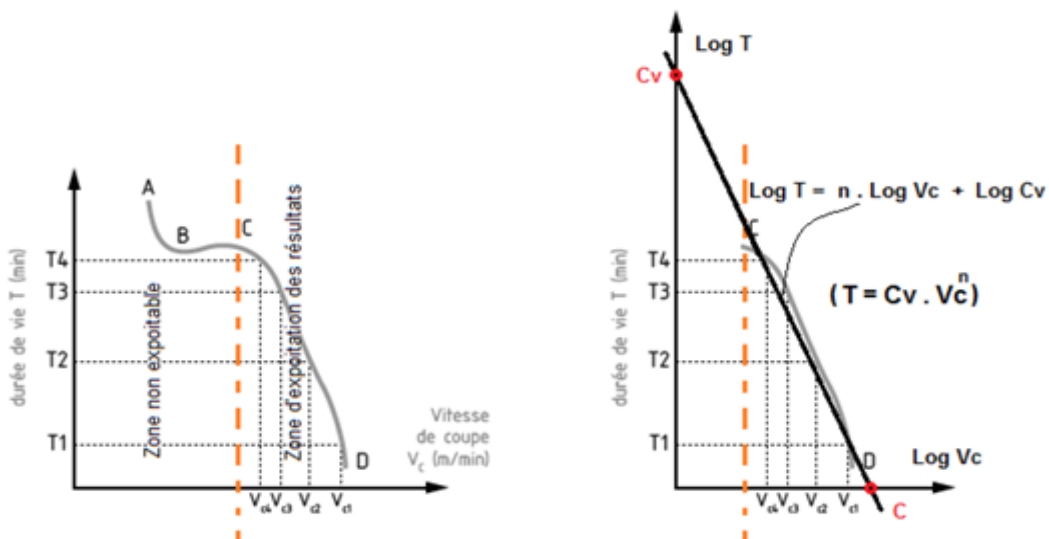


Figure III.2-1 : Analyse graphique par la loi de Taylor [32]

- **Zone non exploitable** : Résultats faussés par des effets physiques néfastes à basse vitesse.

- **Zone d'exploitation** : Données cohérentes avec la loi de Taylor, utilisées pour modéliser et optimiser la coupe.

III.2.1.2 Loi de Gilbert

Le modèle de Gilbert, aussi connu sous le nom de modèle de Taylor généralisé, la durée de vie de l'outil n'est plus seulement juste influencée par la vitesse de coupe, mais également elle prend en considération d'autres facteurs tels que l'avance et la profondeur de passe. Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$T_L = C.V^n f^x ap^y \quad (\text{III.2-2})$$

T_L : temps de vie

V : vitesse de coupe (m/min)

f : avance par tour (mm/tr)

ap : profondeur de passe (mm)

C, n, x, y sont des constantes dépendant du matériau utilisé.

III.2.1.3 Loi de Konig – Depiereux

Ce modèle a également été perfectionné par Koning-Depiereux. Ses travaux ont conduit à une représentation qui reflète de manière plus précise l'évolution de l'usure observée lors des essais expérimentaux. Il propose donc l'expression suivante :

$$T_L = \exp(-\alpha V_c^\mu - \gamma f^v - \delta ap^\lambda) \quad (\text{III.2-3})$$

- T_L : durée de vie de l'outil ou un indicateur lié à la durée avant atteinte d'un seuil d'usure critique.
- V_c : vitesse de coupe (m/min).
- f : avance (mm/tr).
- ap : profondeur de passe (mm).
- α, γ, δ : coefficients empiriques, spécifiques à l'outil et au matériau usiné.
- μ, v, λ : exposants caractérisant la sensibilité de la durée de vie à chaque paramètre de coupe.

III.2.1.4 Loi de Kronenberg

Ce modèle a été élaboré en 1968, ne prend pas en compte l'influence de l'avance et de la profondeur de passe. Il se distingue par le fait qu'il donne une valeur finie de la vitesse de coupe pour une durée de vie donnée. Il est défini par l'équation suivante :

$$T + K = C.V^n \quad (\text{III.2-4})$$

T : durée de vie (min)

V : vitesse de coupe (m/min)

K, **C₁** et **n₁** sont des constantes.

Ces lois permettent d'estimer la durée de vie d'un outil de coupe en se basant sur les paramètres d'usinage appliqués. Le critère de durée de vie moyen standard est VB= 0,3 mm.

III.2.1.5 Bilan des modèles d'usure

Des chercheurs ont proposé des modèles empiriques pour prédire l'usure des outils de coupe, en se basant sur différents paramètres d'usinage. Le (tableau III.2-1) ci-dessous présente de différents modèles, classés chronologiquement.

Tableau III.2-1 : Evolution des modèles analytiques d'usure au fil des années

Modèle	Equation
Taylor (1907)	$T = CV^n$
Gilbert (1950)	$T = C.f^x.ap^y.V^n$
Zorev (1967)	$VB = ct^\mu$
Muller (1967)	$VB(t) = \ln(1+bt) + ct^n$
Koning-Depiereux (1969)	$T = \exp(-\alpha V_c^\mu - \gamma f^\nu - \delta a_p^\lambda)$
Kronenberg (1970)	$T + K = C_1 V^{n_1}$
Sipos (1986)	$VB(t_c) = C_1 t_c \exp(A + B t_c + C t_c^2)$

La figure (III.2-2) illustre les divers modèles. Le modèle de Taylor se distingue par sa simplicité et son approche approximative, en revanche, le modèle avancé de Koning-Depiereux est plus sophistiqué et réussit à reproduire avec précision la loi d'usure. Cependant, à cause des variations remarquées lors des essais d'usure et pour, le modèle de Taylor est régulièrement utilisé pour tous les types de matériaux d'outils. [33]

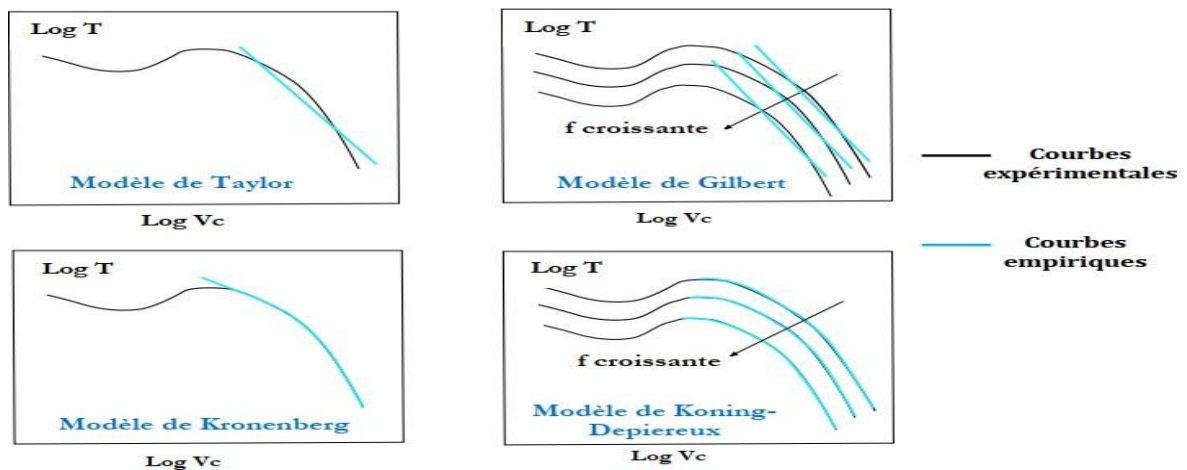


Figure III.2-2 : Représentation graphique des modèles de l'usure

III.2.2 Modèles analytiques

En raison des limites des modèles empiriques dans la prédiction précise de l'usure des outils de coupe et des mécanismes complexes qui y sont associés, les chercheurs ont essayé développer des modèles qui mettent l'accent sur un ou plusieurs mécanisme d'usure notamment l'abrasion, la diffusion... Contrairement aux modèles précédemment présentés, qui fournissent directement une estimation de la durée de vie de l'outil sans décrire l'évolution de son usure dans le temps, ces modèles permettent de prédire l'évolution de la forme de l'outil au cours du temps.

Les principaux modèles analytiques d'usure trouvés dans la littérature sont

III.2.2.1 Modèle de Takeyama et Murata

Ce modèle proposé par Takeyama et Murata a été élaboré en 1963. Il intègre les phénomènes d'usure par abrasion ainsi que par diffusion. Il est formulé par l'expression :

$$\frac{dw}{dt} = G(V, f) + D \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{III.2-5})$$

dw/dt : Le taux d'usure

Ea : l'énergie d'activation du processus de diffusion

R : la constante des gaz parfaits

T : la Température de l'outil

G et D : des constantes du matériau à déterminer expérimentalement

III.2.2.2 Modèle d'Usui et Shirakashi

Ce modèle proposé par Usui et Shirakashi a été élaboré en 1984. Il intègre le phénomène de l'usure par adhésion et s'exprime par l'équation suivante :

$$\frac{dw}{dt} = A \cdot \delta n \cdot Vg \cdot \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \quad (\text{III.2-6})$$

δn : représente la contrainte normale exercée à la surface de contact.

Vg : désigne la vitesse de glissement.

A et B : sont des constantes.

Vg, T et δn : peuvent être déterminés par la Méthode des Éléments Finis ou en associant une méthode analytique à la Méthode des Différences Finies.

III.2.2.3 Modèle d'Archard

L'évaluer de volume de matière perdue par abrasion dans le cas d'un contacte pion disque, Archard a proposé la relation suivante : cette loi demeure applicable dans les situations de frottement glissant à vitesse constante

$$V = k \cdot \frac{Fn}{Pm} \cdot d \quad (\text{III.2-7})$$

K : étant le coefficient d'usure sans unités

F_n : étant l'effort normal appliqué, (N)

P_m : étant la contrainte d'écoulement du matériau le plus mou (MPa)

d : la distance parcourue. (m)

III.2.2.4 Evolution des modèles analytiques d'usure au fil des années

Tableau III.2-2 : Différent modèle analytique

Modèle	Equation
Archard et al (1956)	$v = k \frac{PL}{H}$
Takeyama et Murata (1963)	$\frac{dv}{dt} = \frac{dv_a}{dt}(L, H) + D \exp\left(-\frac{E}{R\theta}\right)$
Koren (1978)	$W(t) = A(e^{\frac{v^n t}{c_1}} - 1) + B(1 - e^{-\frac{vt}{c_2}})$
Usui et Shirakashi (1984)	$\frac{dv}{dt} = C_1 \delta_t V_s \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda \theta}\right)$
Molinari et Nouari (2002)	$dM_i(x, t) = 2w dx \left[\sqrt{\frac{t}{\pi}} D_{il}(T_{int}(x)) (C_{i1}^0 - C_{i2}^0) \right]$
Luo et al (2005)	$\frac{dVB}{dt} = \frac{A}{H} \frac{F_{N/f}}{V \cdot f} V_s + B \exp\left(-\frac{E}{R\theta}\right)$
Palmai (2013)	$\frac{dVB}{dt} = \frac{A}{H} \left[A_a + A_{th} \exp\left(-\frac{w}{Vc + KVB}\right) \right]$

III.2.3 Modèle Numérique

Un **modèle numérique** est une représentation mathématique et informatique d'un phénomène physique, développée pour simuler et prédire le comportement d'un système réel. Dans le contexte de l'usinage, ces modèles permettent de simuler les efforts de coupe, l'usure des outils, la température et d'autres grandeurs difficiles à mesurer expérimentalement, grâce à des méthodes comme la méthode des éléments finis, ces simulations sont généralement réalisées à l'aide de logiciels spécialisés tels que **DEFORM**.

Ces modèles offrent une alternative économique aux essais physiques qui permet d'optimiser les conditions de coupe en réduisant les temps et les coûts de développement.

III.2.3.1 Application au modèle numérique

Dans cette modélisation, nous avons utilisé le logiciel de calcul DEFORM 2D pour analyser le comportement mécanique du couple outil-pièce pendant l'usinage.

III.2.3.1.1 Présentation de logiciel DEFORM

DEFORM est un puissant logiciel de simulation par la méthode des éléments finis qui nous permet de reproduire virtuellement différents procédés industriels comme l'usinage, le

forgeage ou les traitements thermiques. Ce logiciel, développé par la société américaine SFTC, L'outil est particulièrement précieux pour nous permettre de comprendre et de prévoir des phénomènes complexes tels que les déformations significatives des métaux, les transferts thermiques ou l'usure progressive des outils de coupe.

Ce qui confère à DEFORM une grande praticité, c'est sa bibliothèque exhaustive de propriétés des matériaux ainsi que l'efficacité de ses algorithmes. Ce qui rend DEFORM vraiment pratique, c'est sa bibliothèque complète de propriétés matériaux et ses algorithmes performants. Grâce à ces fonctionnalités, on peut obtenir des simulations réalistes du comportement des pièces et des outils sous différents chargements, ce qui nous évite de multiplier les essais physiques souvent longs et coûteux. Dans l'industrie, c'est devenu un outil précieux pour améliorer nos procédés de fabrication, garantir la qualité de nos productions et maximiser la durée d'utilisation de nos outils.

III.2.3.1.2 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis constitue une approche de calcul numérique destiné à analyser différents défis rencontrés en sciences appliquées et en physique. Son utilisation s'étend particulièrement aux champs disciplinaires incluant l'analyse structurelle, les processus de conduction thermique, les interactions électromagnétiques et l'hydraulique computationnelle. Voici un aperçu de cette méthode, ses principales étapes et ses applications.

III.2.3.2 Implémentation des modèles de comportement outil/pièce dans DEFORM

Repose sur des modèles numériques sophistiqués (Archard, Usui, Takeyama-Murata...) qui reproduisent les phénomènes physiques d'endommagement, dans le contexte de notre investigation portant sur l'usure des instruments de coupe, nous avons implémenté le modèle d'Usui et Shirakashi dans DEFORM, Contrairement aux approches de simulation simplifiées, cette méthode privilégie une modélisation holistique des phénomènes de contact en combinant les aspects mécaniques (cisaillement) et thermiques (échauffement) via DEFORM.

L'avantage comparatif de cette approche réside dans sa double capacité analytique suivi évolutif de l'usure outillage et détection anticipée des points critiques de frottement., ainsi que d'ajuster les conditions de coupe pour améliorer la performance globale du processus.

III.2.3.2.1 Caractéristiques de matériaux

Pour l'outillage : WC (Carbure de tungstène)

La composition atomique du carbure de tungstène (WC) se caractérise par une répartition équitable entre les éléments tungstène et carbone. Reconnu pour sa dureté exceptionnelle et sa résistance à l'usure, ce matériau est devenu un choix privilégié dans de

nombreuses applications industrielles. Sa polyvalence constitue un facteur clé dans la conception d'outils de coupe, d'abrasifs et de surfaces robustes face à l'usure.

Tableau III.2-3: Propriétés du Carbure de Tungstène (WC)

Dureté	Juste après le diamant, environ 8,5 à 9 sur l'échelle de Mohs.
Densité	Environ 15,6 g/cm ³ , offrant une bonne stabilité sous contrainte.
Point de fusion	Élevé, environ 2 870 °C, résistant à des températures extrêmes.

Pour la pièce : IN718 (L'Inconel 718)

L'Inconel 718 est un superalliage à base de nickel reconnu pour sa haute résistance, sa tenue exceptionnelle face à la corrosion et ses remarquables propriétés mécaniques, même à des températures élevées. Couramment utilisé dans des industries telles que l'aérospatiale, le pétrole et le gaz, l'automobile et la production d'énergie.

Tableau III.2-4 : Constituants de l'Inconel 718

Constituants	Nickel (Ni)	Chrome (Cr)	Fer (Fe)	Molybdène (Mo)	Niobium (Nb)	Titane (Ti)
Pourcentage	50-55 %	17-21 %	Jusqu'à 19 %	2,8-3,3 %	4,75-5,5 %	0,65-1,15 %

Tableau III.2-5 : Récapitulatif des données pour l'opération d'usinage sur DEFORM

Paramètre	Valeur
Vitesse de coupe	100 m/min
Avance	0.1 mm/rev
Diamètre de pièce	50 mm
Température	20 °C
Matière d'outil	Carbure de tungstène (WC)
Matière de la pièce	Inconels 718 (IN718)
Maillage d'outil	1000
Maillage de la pièce	25

III.2.4 Simulation DEFORM “Processus d’usinage”

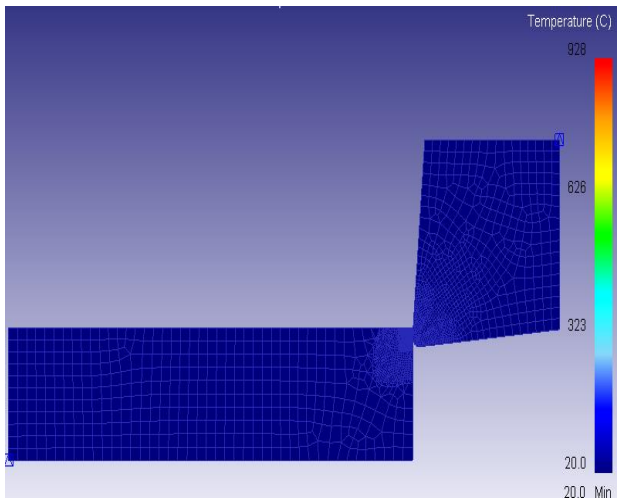


Figure III.2-3 : Avant l’opération

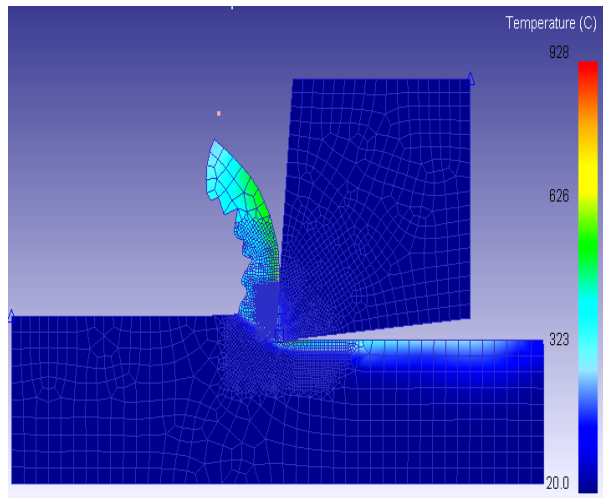


Figure III.2-3 : durant l'opération

III.2.5 Conclusion

Ce chapitre a exploré les mécanismes d'usure (abrasion, adhésion, diffusion) et leurs formes (cratère, dépouille), ainsi que les modèles pour les prédire (Taylor, Usui, Archard). Les simulations numériques via DEFORM, couplées aux modèles analytiques, ont permis d'étudier l'évolution de l'usure sous différentes conditions. Ces instruments s'avèrent cruciaux pour maximiser la longévité de l'outillage et diminuer les dépenses industrielles.

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1 Introduction

Cette section présente les résultats des simulations effectuées avec la modélisation DEFORM et des protocoles expérimentaux dédiés à l'usure outillage. L'investigation multiparamétrique évaluera l'impact des variables de procédé sur la dynamique d'usure, en suivant les traces thermiques, des spectres de force et des volumes de matière transformée.

Les simulations DEFORM permettent de modéliser les conditions d'usinage et d'évaluer les performances des outils. Nous utiliserons le modèle de Taylor pour estimer l'usure en fonction de la vitesse de coupe et d'autres paramètres, ainsi que le modèle d'Archard pour quantifier l'usure par abrasion en tenant compte des forces de contact et des propriétés des matériaux.

Une discussion approfondie suivra pour interpréter les données, identifier des tendances significatives et proposer des recommandations visant à optimiser la durabilité des outils de coupe dans un contexte industriel.

IV.2 Discussion des résultats de simulation Deform

IV.2.1 Distribution de la température

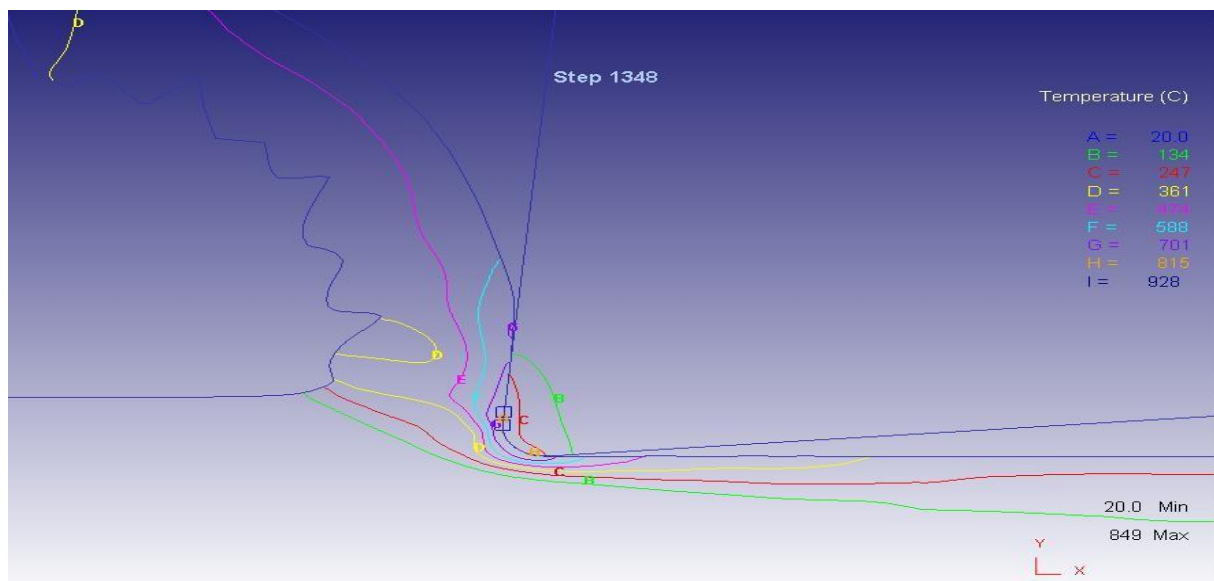


Figure IV.2-1 : Les zones de distribution de température

La (Figure IV.2-1) représente une distribution thermique hétérogène avec trois zones distinctes : une zone froide (20-247°C), une zone intermédiaire (361-701°C), et une zone chaude (916-928°C).

Cette différence de température s'explique par :

- La friction qui crée plus de chaleur à certains endroits
- La façon dont le matériau conduit la chaleur
- Les réglages de la machine

IV.2.2 Représentation graphique de la variation de température

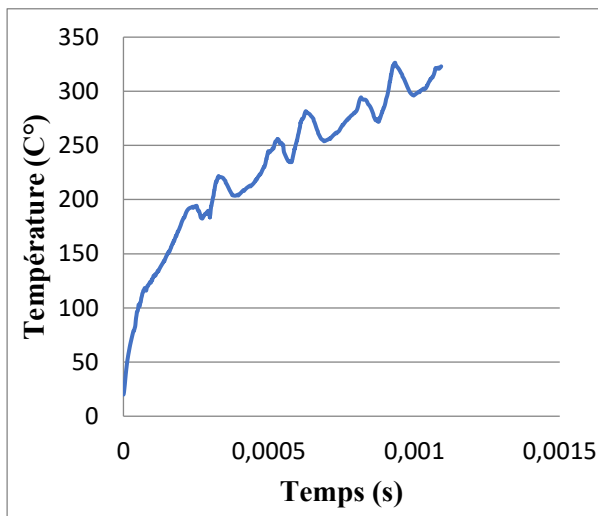


Figure IV.2-2 : Variation de température pour la pièce

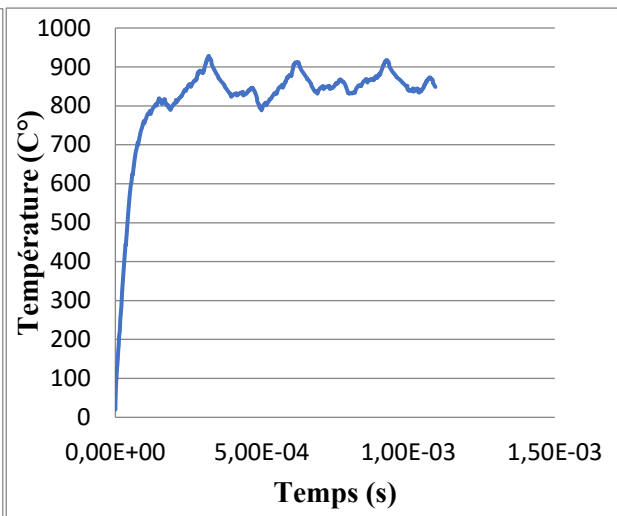


Figure IV.2-3 : Variation de température d'outil

Les courbes ci-dessous montrent comment la température au niveau de l'outil et de la pièce change pendant un court temps (jusqu'à 1,5 milliseconde).

Une montée en température extrêmement rapide due aux frottements et à la déformation plastique, L'outil subit une élévation thermique significative ($>900^{\circ}\text{C}$) provoquée par la dissipation d'énergie liée à la déformation plastique intense et aux contraintes de cisaillement interfaciales.

IV.2.3 Évolution des charges en fonction du temps

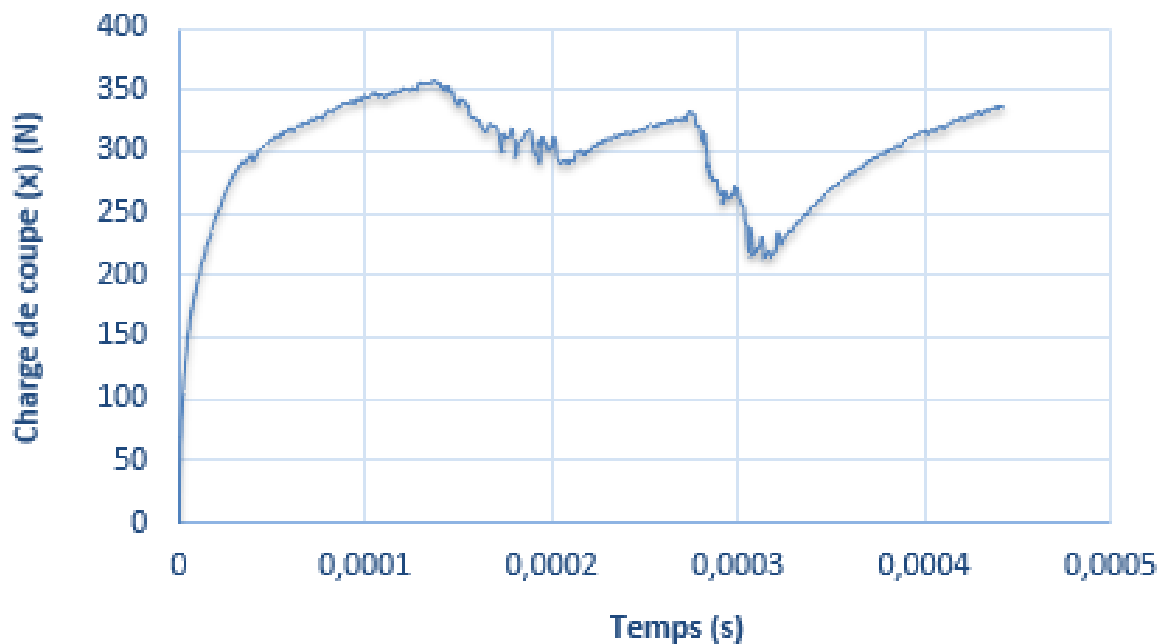


Figure IV.2-4 : Évolution de la charge selon (x)

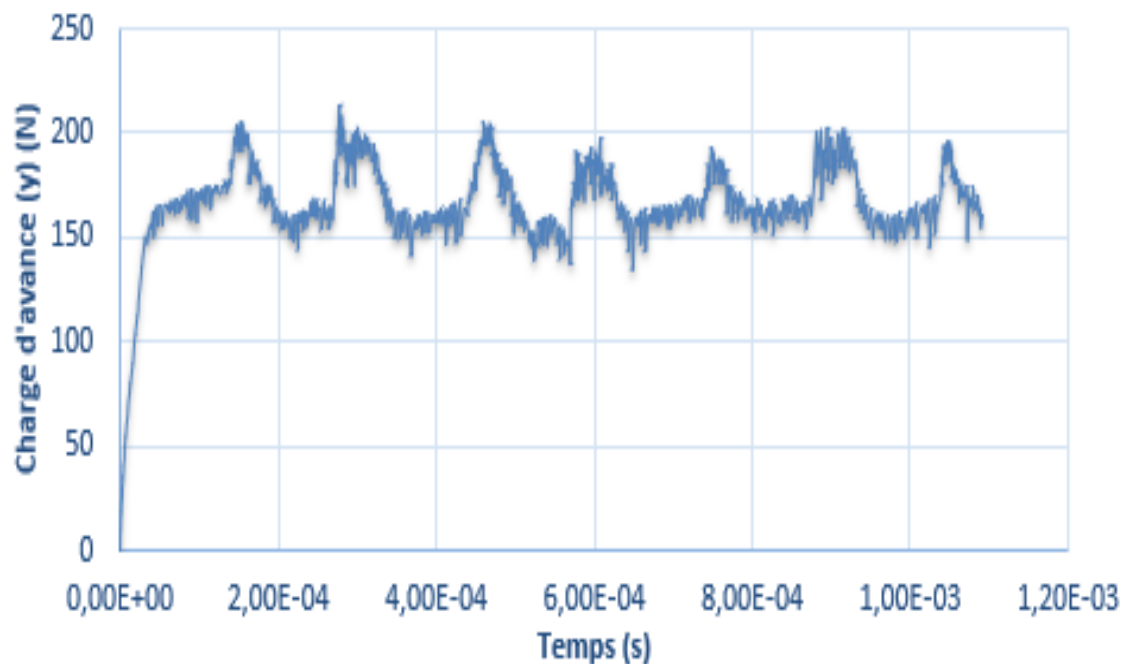


Figure IV.2-5 : Évolution de la charge selon (Y)

Les graphes montrent comment la charge appliquée sur l'outil de coupe évolue au cours du temps pendant une opération de coupe.

Axe X : Représente le **temps** (en secondes).

Axe Y : Représente la **charge** (en Newtons).

Observations principales :

Force de coupe (x) : On observe que les efforts principaux orientée selon la direction de coupe (axe de direction d'avance de l'outil) dominant l'ensemble des efforts reflétant la résistance directe du matériau à la pénétration.

Le pic de cette force indique l'effort maximal requis pour déformer ou trancher la matière.

Force d'avance (Y) : (perpendiculaire à la coupe), liée aux efforts secondaires comme le frottement latéral ou la déviation de l'outil.

IV.2.4 Volume enlevé au cours du temps

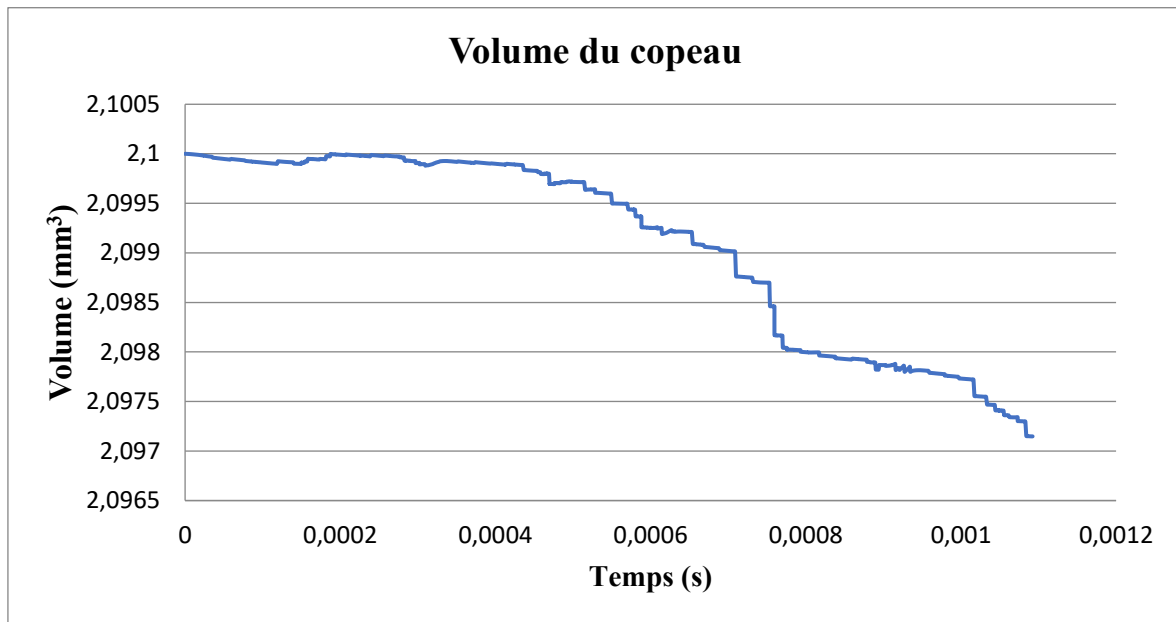


Figure IV.2-6 : le volume de copeau enlevé

Ce graphique montre l'évolution du volume de matière enlevée, où l'on observe une diminution progressive mais légèrement décroissante du taux d'enlèvement au cours du temps. Cette diminution révèle l'impact de l'usure de l'outil sur l'efficacité de coupe lorsque le tranchant se dégrade, sa capacité à enlever la matière diminue, ce qui se traduit par une réduction du volume usiné par unité de temps.

IV.2.5 Conclusion

Les résultats révèlent une concentration thermique critique ($>900^{\circ}\text{C}$) à l'interface outil/pièce, avec une dissipation préférentielle dans le copeau, principalement localisée sur l'arête de coupe. Les efforts de coupe, dominés par la composante axiale, augmentent significativement avec la dégradation de l'outil, montrant une corrélation directe entre température élevée et accélération de l'usure. Ces observations, obtenues par modélisation éléments finis, identifient clairement les paramètres critiques (thermiques et mécaniques) pour optimiser les conditions d'usinage de l'IN718 avec outils en WC, tout en validant l'approche numérique comme outil prédictif fiable pour la gestion de la durée de vie des outils.

IV.3 Résultats de calcul de l'usure avec le modèle de Taylor modifié

Cette partie de calcul vise à étudier l'influence de la vitesse de coupe (V_c) sur l'usure de dépouille (V_b) en s'appuyant sur le modèle de l'article de [Bloul et al] [2]. Leur loi de Taylor modifiée, calibrée pour des vitesses comprises entre (35 et 70 m/min), sera étendue à de nouvelles plages de vitesses, afin d'analyser le comportement de V_b dans des conditions non couvertes par l'étude originale.

IV.3.1 Equation de modèle Taylor modifiée

La loi d'usure empirique classique est donnée par :

$$V_b(t) = k V_c^{a_1} f_a^{a_2} a_p^{a_3} a_e^{a_4} t^{a_5} \quad (\text{IV.3-1})$$

Où :

- $V_b(t)$: est l'usure en dépouille (mm).
- K : est une constante.
- V_c : est la vitesse de coupe (m/min).
- f_a : l'avance par tour (mm/t).
- a_p : la profondeur de passe (mm).
- a_e : l'engagement (mm).
- t : le temps d'usinage (min).

IV.3.2 Code de calcul MATLAB

Utilisation du logiciel de calcul Matlab pour déterminer les inconnues : k , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 .

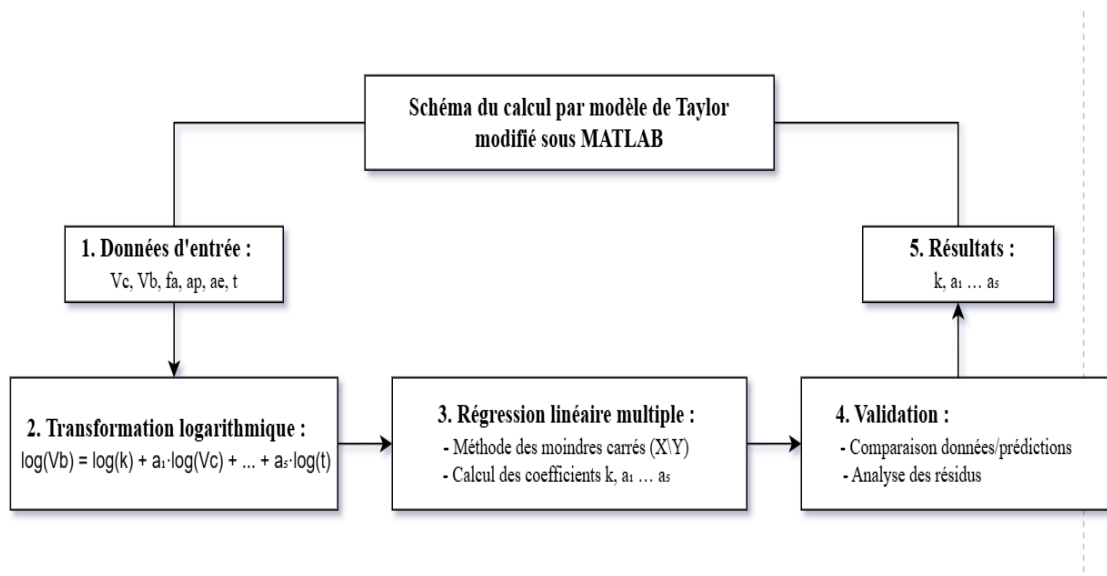


Figure IV.3-1 : Schéma de procédure de calcul MATLAB

Tableau IV.3-1 : Résultats de calcul MATLAB

Les coefficients	k	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
Les résultats	0.4897	-0.4193	-0.2002	0.6763	0.0013	-0.1579

On aura à la fin l'équation de $V_b(t)$ comme suit :

$$V_b(t) = 0.4897 V_c^{-0.4193} f_a^{-0.2002} a_p^{0.6763} a_e^{0.0013} t^{-0.1579} \quad (\text{IV.3-2})$$

On aura donc le tableau qui regroupe les données, permet de calculer V_b pour différentes vitesses et d'autres paramètres.

Tableau IV.3-2: Résultats de calcul $V_b(t)$ avec des différents vitesses et paramètres

T (min)	V_b (mm)	V_c (m/min)	F_a (mm/t)	A_p (mm)	A_e (mm)
4,99	0,098	25	0.1	0.5	0.5
10	0,134	25	0.1	1	0.5
54	0,34	25	0.1	5.5	3
39,94	0,29	25	0.2	8	6
3,01	0,119	50	0.1	0.5	0.5
18,83	0,3	50	0.1	5.5	3
15,09	0,254	50	0.2	5	4
0,86	0,075	50	0.35	0.5	0.5
0,64	0,065	80	0.35	0.5	0.5
2,26	0,098	80	0.1	0.5	0.5
4,3	0.1825	80	0.1	2,5	1,5
7	0.3057	80	0.1	6	2

IV.3.3 Influence de la vitesse sur usure (V_b) en fonction de temps

Tableau IV.3-3: Variation d'usure en fonction de temps pour la vitesse $V=25$ (m/min)

Temps (min)	0.86	2.49	15.09	39.94
Usure V_b (mm)	0.0643	0.0848	0.131	0.309

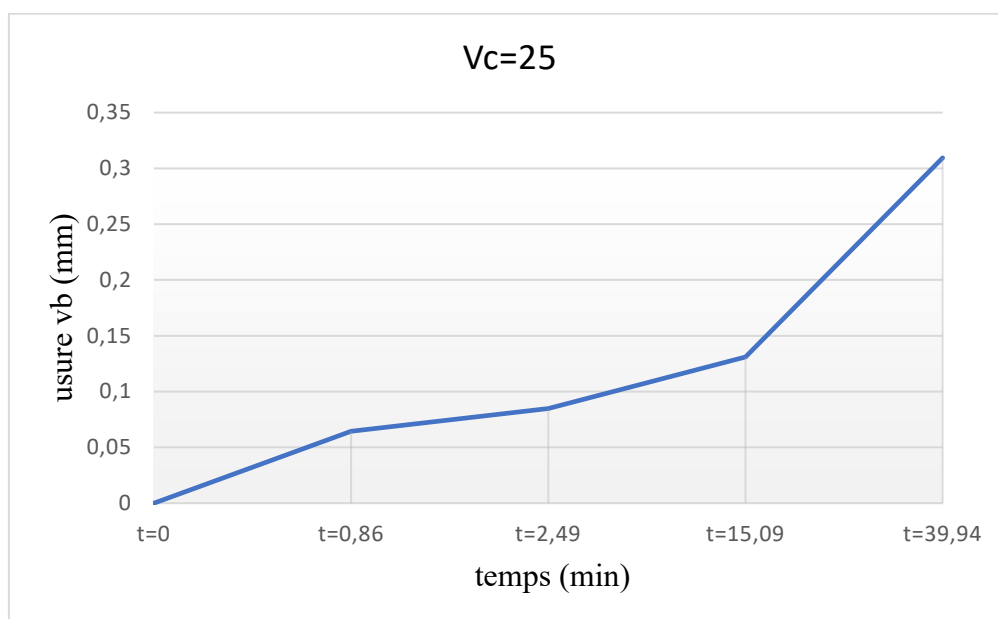


Figure IV.3-2 : Variation d'usure en fonction de temps pour $V_c=25$ (m/min)

L'usure V_b de l'outil évolue progressivement de 0 mm à 0,35 mm après 54 min d'usinage. On remarque qu'à une vitesse de coupe faible (25 m/min), l'outil subit une usure modérée. Cela suggère que les contraintes mécaniques et thermiques sont moins sévères, permettant une durée de vie plus longue de l'outil.

Tableau IV.3-4: Variation d'usure en fonction de temps pour la vitesse $V=50$ (m/min)

Temps (min)	0.86	2.49	15.09	39.94
Usure V_b (mm)	0.0839	0.13	0.292	0.344

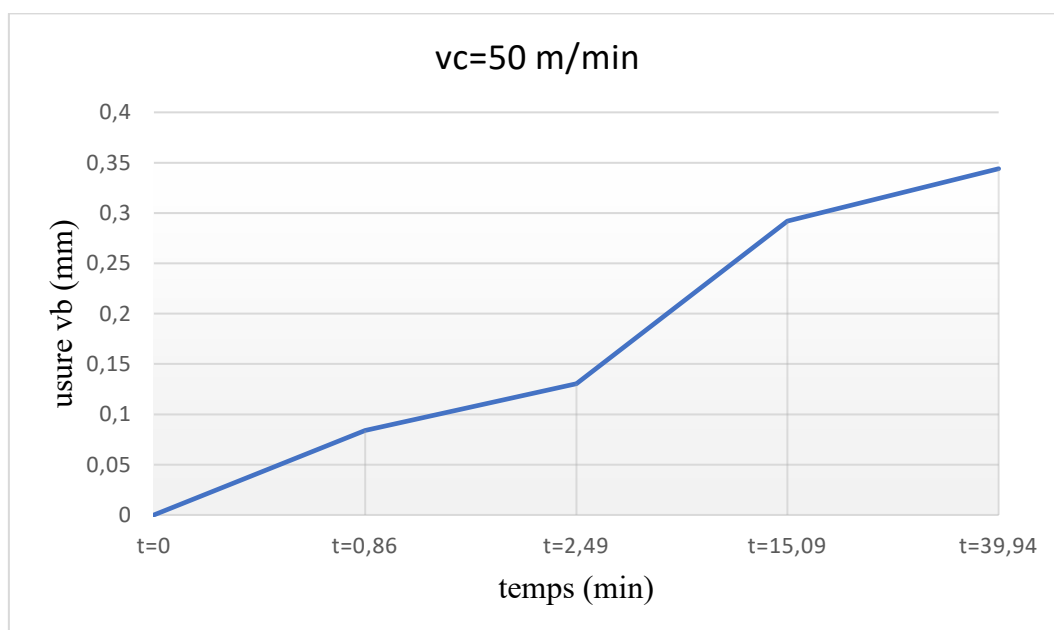


Figure IV.3-2: Variation d'usure en fonction de temps pour la vitesse $V=50$ (m/min)

L'usure V_b évolue plus rapidement, atteignant environ 0,35 mm en seulement 18,83 min. On voit qu'à cette vitesse intermédiaire, l'augmentation de l'usure est plus marquée en raison des contraintes thermiques et mécaniques plus élevées.

Tableau IV.3-5: Variation d'usure en fonction de temps pour la vitesse $V=80$ (m/min)

Temps (min)	0.86	2.49	15.09	39.94
Usure V_b (mm)	0.091	0.127	0.338	0.402

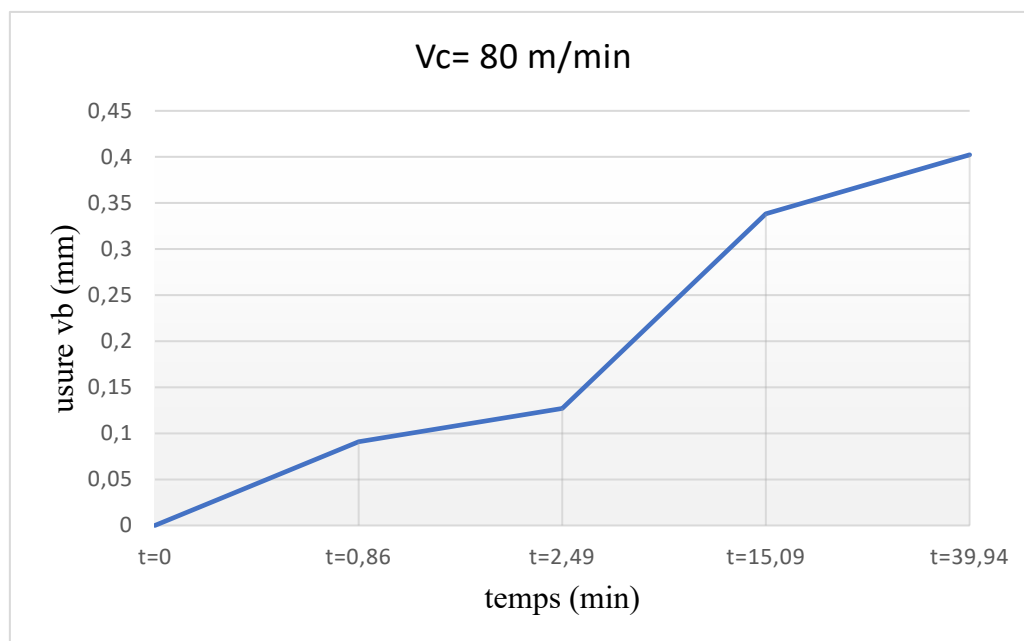


Figure IV.3-3: Variation d'usure en fonction de temps pour la vitesse $V=80$ (m/min)

On remarque que pour cette vitesse (80 m/min), V_b progresse très rapidement, atteignant environ 0,35 mm en seulement 7 minutes.

L'usure est significativement plus rapide en raison de l'augmentation de température et des forces de coupe, cette vitesse est utilisée pour des opérations nécessitant une productivité élevée mais au détriment de la longévité de l'outil.

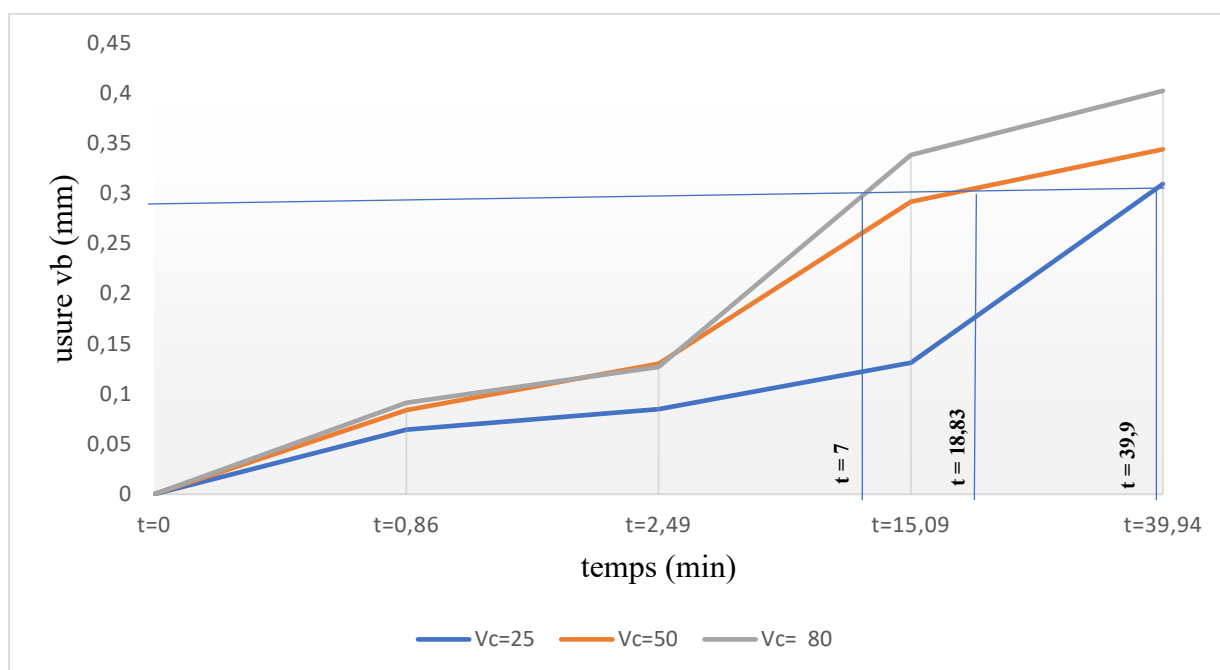


Figure IV.3-4: Représentation graphique de point critique d'usure (V_b) en fonction de temps

Le seuil d'usure de **0,3 mm** est identifié comme un point critique. Au-delà de cette valeur, la performance de l'outil se dégrade significativement, risquant d'affecter la qualité d'usinage ou d'entraîner une rupture.

Plus la vitesse de coupe (V_c) est élevée, plus l'usure de l'outil progresse rapidement. Cela est cohérent avec le **modèle de Taylor**, qui établit une relation exponentielle entre la vitesse de coupe et la durée de vie de l'outil.

IV.3.4 Influence de la profondeur de passe (a_p) sur l'usure V_b

Tableau IV.3-6: variation de la profondeur de passe (a_p) pour $V_c = 25$ m/min

Profondeur de passe a_p (mm)	0.5	1	5.5
L'usure V_b (mm)	0.098	0.134	0.34

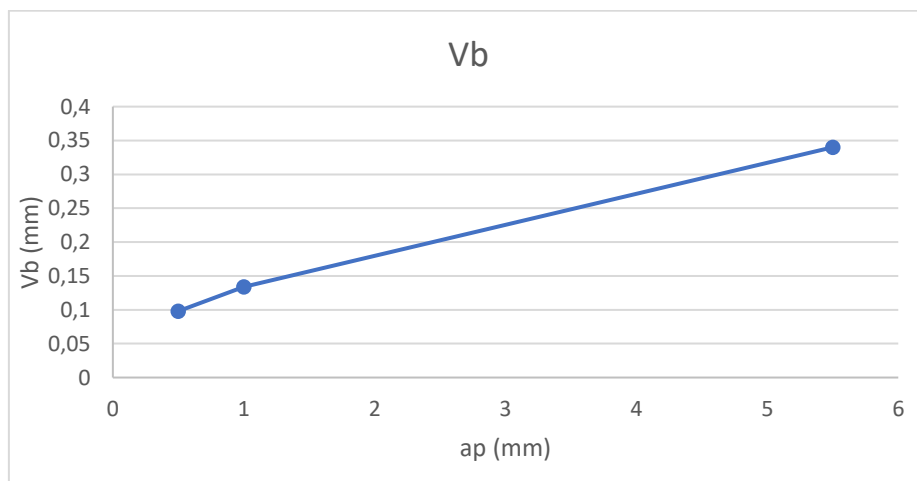
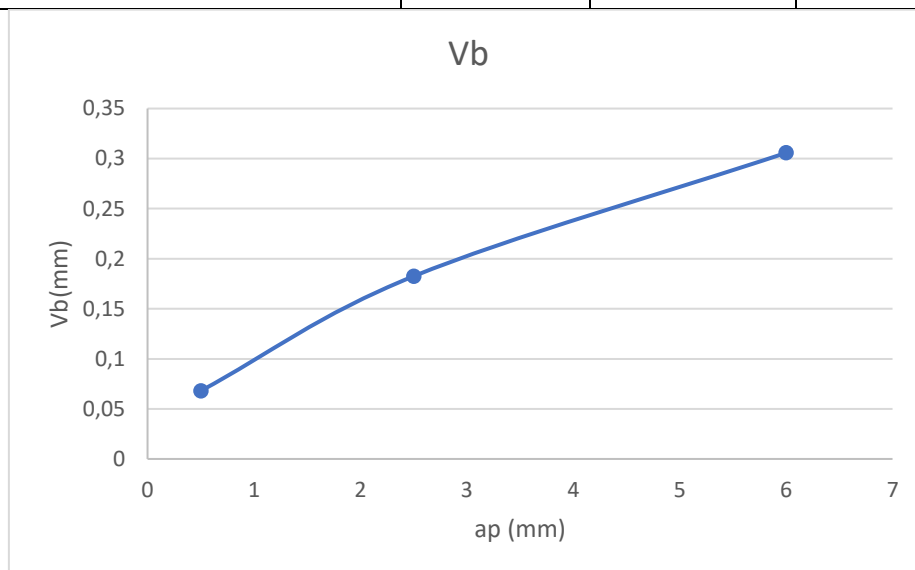


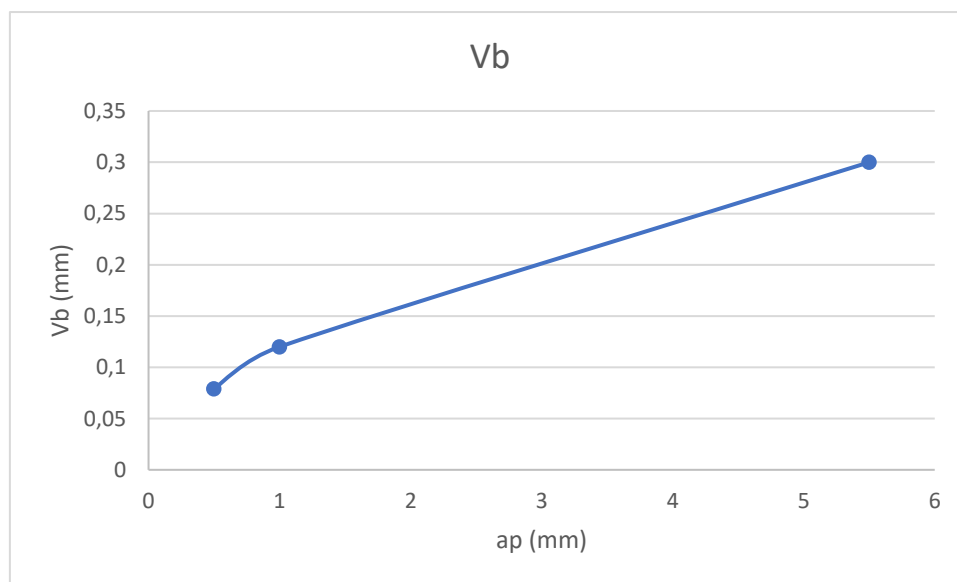
Figure IV.3-6 : variation de la profondeur de passe (a_p) pour $V_c = 25$ m/min

Tableau IV.3-7: variation de la profondeur de passe (a_p) pour $V_c=50$ m/min

Profondeur de passe a_p (mm)	0.5	2.5	6
L'usure V_b (mm)	0.068	0.1825	0.3057

**Figure IV.3-7 :** variation de la profondeur de passe (a_p) pour $V_c=50$ m/min**Tableau IV.3-8 :** variation de la profondeur de passe (a_p) pour $V_c=80$ m/min

Profondeur de passe a_p (mm)	0.5	1	5.5
L'usure V_b (mm)	0.079	0.12	0.3

**Figure IV.3-8 :** variation de la profondeur de passe (a_p) pour $V_c=80$ m/min

Une augmentation de l'avance par tour (a_p) accroître les forces de coupe, augmentant le frottement sur le flanc de l'outil et accélérant son usure (V_b). Et élève également la température, provoque l'usure par adhésion (transfert de matière) ou diffusion (migration d'éléments). Ces

effets mécaniques et thermiques combinés réduisent la durée de vie de l'outil lorsque a_p est important.

IV.4 Résultats de calcul d'usure par le modèle Archard

Le **modèle d'Archard** est souvent utilisé, établissant une relation entre la pression de contact, la distance de glissement et le taux d'usure. Cette étude présente une analyse des résultats obtenus à partir des calculs d'usure basés sur ce modèle (IV.4-1), en mettant en évidence les paramètres clés qui accélèrent ou ralentissent la dégradation des outils.

$$V = k \cdot \frac{F_p}{P_m} \cdot L \quad (\text{IV.4-2})$$

Pour les matériaux (WC, IN718) on a :

- $k = 3 \times 10^{-3}$
- $P_m = 4 \times 10^9 \text{ Pa (IN718)}$

Le choix de contrainte d'écoulement du matériau le plus mou (**P_m**), d'après la loi d'Archard qui décrit l'usure par abrasion, où le matériau dur (carbure de tungstène, WC) creuse le matériau plus mou (IN718). Dans ce processus, c'est le matériau mou (IN718) qui s'use et se déforme préférentiellement au contact du WC.

Tableau IV.4-1: Donnée extrait d'après l'article [bloul et al] [2]

PASS	t(min)	Vc(m/min)	Fp (N)	L (mm)
3	0.86	52	515	1.9
6	0.86	52	628	1.9
9	0.86	52	981	1.9
3	2.26	70	395	1.9
6	2.26	70	492	1.9
9	2.26	70	885	1.9
2	4.53	35	399	1.9
6	4.53	35	501	1.9
9	4.53	35	600	1.9

IV.4.1 Code de calcul MATLAB

On utilise un programme MATLAB pour calculer les valeurs d'usure, voici un schéma qui illustre les étapes de calcul du volume d'usure V selon le modèle d'Archard dans MATLAB

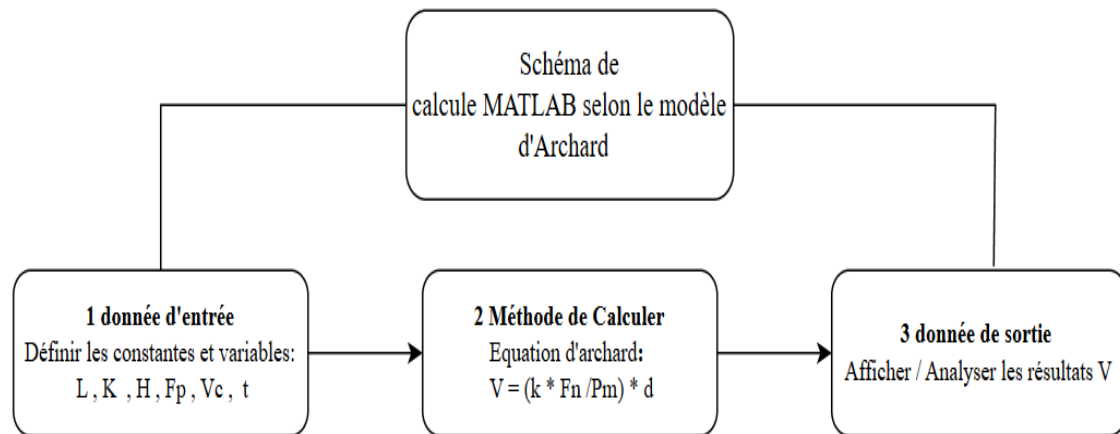


Figure IV.4-1: Schéma des étapes de calcul du volume d'usure (v) MATLAB

IV.4.2 Résultats de l'évolution du volume d'usure (V) en fonction de la charge appliquée (F_p)

Tableau IV.4-2: Volume d'usure (v) en fonction de la charge (F_p) pour $t=4.53$ min et $V_c=35$ m/min

Charge appliquée F_p (N)	389	501	600
Volume d'usure V (mm³)	0.0791	0.0993	0.1190

Tableau IV.4-3: Volume d'usure (v) en fonction de la charge (F_p) pour $t=0.86$ min et $V_c=50$ m/min

Charge appliquée (F_p)	515	628	981
Volume d'usure (V)	0.0288	0.0351	0.0548

Tableau IV.4-4: Volume d'usure (v) en fonction de la charge (F_p) pour $t=2.26$ min et $V_c=70$ m/min

Charge appliquée (F_p)	395	492	885
Volume d'usure (V)	0.0781	0.0973	0.1750

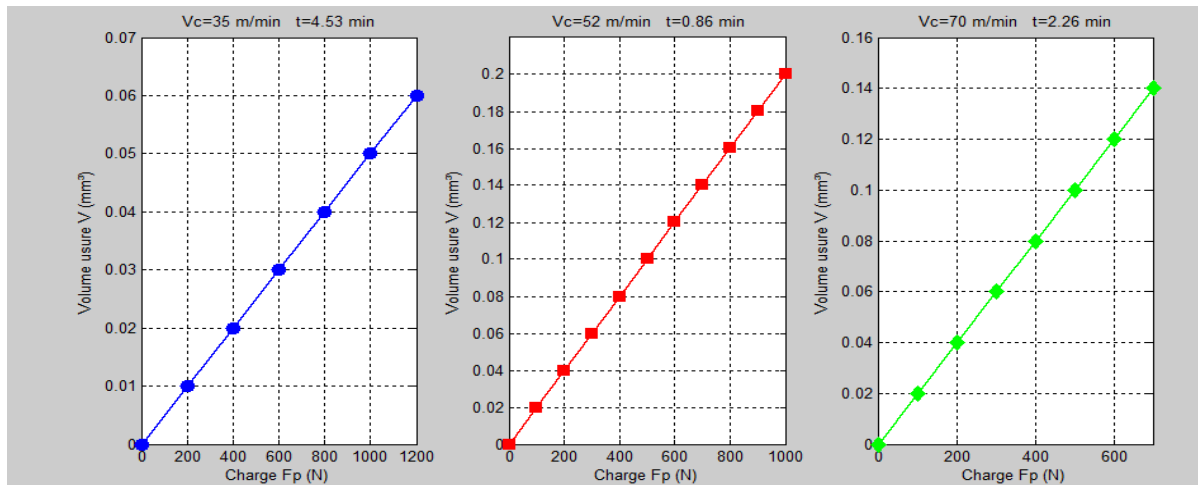


Figure IV.4-2: l'évolution du volume d'usure (V) en fonction de la charge appliquée (F_p)

Les trois graphiques montrent l'évolution du volume d'usure (V) en fonction de la charge appliquée (F_p) pour trois vitesses de coupe différentes (35 m/min, 52 m/min et 70 m/min). On remarque :

- Tous les essais confirment que l'usure augmente avec la charge (F_p)
- Les données montrent que l'usure dépend à la fois de F_p et de V_c .

IV.5 L'importance de la modélisation et le choix des modèles en usinage

L'approche de modélisation des phénomènes d'usure outillage représente un aspect capital pour interpréter et pronostiquer la pérennité et le rendement des instruments de coupe.

Les outils de simulation d'usure procurent les moyens d'étudier ces facteurs et d'optimiser les processus d'usinage.

Dans le cadre académique, la sélection du modèle d'usure sera tributaire des conditions expérimentales spécifiques et des objectifs de recherche. Les considérations méthodologiques incluent :

- **Pour des conditions de coupe constantes** : Le modèle de Taylor modifié peut-être suffisant pour des estimations rapides.
- **Pour des matériaux difficiles à usiner** : Le modèle d'Usui est préférable en raison de sa capacité à prendre en compte l'abrasion et les effets thermiques.
- **Pour des applications nécessitant une précision élevée** : Le modèle d'Archard est le plus adapté, car il permet une quantification détaillée de l'usure en fonction des forces de contact et de la dureté des matériaux.

IV.6 Conclusion

Les modèles de Taylor modifié, d'Usui et d'Archard offrent chacun des perspectives uniques sur l'usure des outils en usinage. Pour déterminer le modèle approprié, il convient d'évaluer les conditions spécifiques de l'usinage, d'analyser les matériaux impliqués et de définir clairement les objectifs de l'analyse. Une compréhension approfondie de ces modèles permet aux ingénieurs et aux techniciens de prendre des décisions éclairées pour optimiser les performances des outils et prolonger leur durée de vie.

Conclusion générale

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons exploré les différents modèles de modélisation de l'usure des outils en usinage, un sujet important pour l'optimisation des processus de fabrication. L'usure des outils de coupe a un impact significatif sur la qualité des pièces usinées, la productivité et les coûts de production. Ainsi, comprendre et prédire ce phénomène est essentiel pour améliorer l'efficacité des opérations d'usinage.

Les différents modèles de modélisation tels que les approches empiriques (comme la loi de Taylor) et les modèles analytiques (comme ceux de Takeyama-Murata et d'Archard), offrent des perspectives variées sur les mécanismes d'usure. Pour les investigations expérimentales, la détermination du modèle optimal se base sur les paramètres d'essai spécifiques, les matériaux testés et les buts d'évaluation. En intégrant ces modèles dans des simulations numériques, comme celles réalisées avec le logiciel DEFORM, il est possible de prédire avec précision l'évolution de l'usure des outils, contribuant ainsi à une meilleure gestion de la maintenance et à une réduction des coûts opérationnels.

En somme, l'étude et le choix des modèles de modélisation d'usure d'outil sont essentiels pour garantir l'efficacité et la durabilité des outils dans les applications industrielles.

Références

- [1] E. C. A. F. C. C. G. A. Attanasio, « Investigation and FEM-based simulation of tool wear in turning operations,» *Elsevier "wear"*, 2010.
- [2] H. C. M. M. Benattia Bloul, «Study of the influence of cutting parameters on tool wear and the state of the machined surface,» 2024.
- [3] C. Y. X. L. ., X. L. ., S. Y. L. L. W. Zhibo Liu, «Research on Tool Wear Based on 3D FEM Simulation for Milling Process,» 2020.
- [4] S. S. H. H. F. Salvatorea, «Modeling and simulation of tool wear during the cutting process,» 2013.
- [5] R. M. H. TAKEYAMA, «Basic Investigation of Tool Wear,» 1963.
- [6] E. U. e. T. SHIRAKASHI, «ANALYTICAL PREDICTION OF CUTTING TOOL WEAR,» 1984.
- [7] C. M. F. Halila, «Modélisation par une approche probabiliste et tribologique de l'usure par abrasion des outils de coupe,» 2013.
- [8] P. N. W. H. J. S. P. L. W. Grzesik, « Investigation of tool wear in the turning of Inconel 718 superalloy in terms of process,» 2017.
- [9] A. M. Ståhl Jan-Eric, «Modelling of metal cutting tool wear based on Archard's wear equation,» 2008.
- [10] H. B. S. B. N. K. M.A. YALLESE, «INVESTIGATION EXPERIMENTALE SUR L'USURE DES OUTILS,» 2007.
- [11] O. Oullié, «Eléments d'usinage et métrologie dimensionnelle,» ESTML, Québec, 2009.
- [12] R. BERGHIDA, «Impact de la signature des outils de coupe sur la variation de la géométrie des pièces mécaniques,» Université Mentouri-Constantine, Constantine, 2006.
- [13] A. PASSERON, «Tournage,» *Technique de l'ingenieur*, n° %1BM 7086, 1998.
- [14] *Fabrication mécanique*.
- [15] International Organization for Standardization , *ISO 3002, "Basic quantities in cutting and grinding"*, Geneva : International Organization for Standardization, 1982.
- [16] L. Raynald, «Application de la théorie de second gradient a la coupe des matériaux,» Université Bordequx I, france , 2004.
- [17] J. CARVILL, "Mechanical Engineer's Data Handbook," *Elsevier Science* , 1993.
- [18] G. J. L. Rimmbaud, Guide pratique de l'usinage-fraisage, Collection n° 6 - Edition n° 06 éd., 1999.
- [19] Société SANDVIK-COROMANT, «Fraisage : Principe,» *Technique de l'ingénieur*, n° %1BM 7082, 2001.
- [20] Société SANDVIK-COROMANT, «Perçage,» *Technique de l'ingénieur*, n° %1BM 7088, 2001.
- [21] J. A. Campa, Technologie professionnelle générale pour les mécanismes, France: Les éditions Foucher, 1997.
- [22] S. Milton, «modelgebaseerdbewerken.be,» 02 mai 2023. [En ligne]. Available: <https://www.modelgebaseerdbewerken.be/>. [Accès le 15 03 2025].
- [23] F. BAGUR, «Matériaux pour outils de coupe,» *Techniques de l'ingénieur*, n° %1BM 7080, 1999.

- [24] M. GUEDICHE, «MODélisation et Simulation de l'Usure des Outils de coupe au cours du processus d'enlèvement de matière : Approche expérimentale et numérique (MOSUOC),» Ecole Centrale de Lyon, Lyon, 2017.
- [25] S. ATLATI, «Développement d'une nouvelle approche hybride pour la modélisation des échanges thermiques à l'interface outil-copeau : application à l'usinage de l'alliage d'aluminium aéronautique AA2024-T351,» EMMA - Ecole Doctorale Energie - Mécanique - Matériaux, FRANCE, 2012.
- [26] S. GARA, «Productique - Procédés d'usinage.,» Ellipses, Tunis, 2014.
- [27] M. E. L. BENNEGADI, «Coupe des métaux en Fabrication Mécanique et Productique,» Université Mohamed Boudiaf, Oran, 2018.
- [28] B. Heineman, Metal cutting, Ternt EM, 2000.
- [29] Sandvik Coromant Intern, Performance testing, "Wear guide", Västberga, 2018.
- [30] L. TN, "Adhesion and diffusion wear in metal cutting," *J Inst Eng India* , pp. 43 :108-41, 1962.
- [31] A. LABIDI, «Prédiction de l'usure et de la durée de vie des outils de coupe lors du tournage des aciers,» Université de 8 Mai 1945, Guelma, 2012.
- [32] B. B. Mohammed, *Coupe des métaux*, Batna: Université de batna, 2023.
- [33] T. Hamza, «INFLUENCE DE L'USURE DES OUTILS DE COUPE SUR LA QUALITE D'USINAGE DISCONTINUE,» UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR , ANNABA , 2020.
- [34] O. Olivier, «éléments d'usinage et metrologie dimensionnelle,» ESTML, Québec , 2009.
- [35] Y. ALTINTAS, Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design, UK: University of cambridge press, 2012.