



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Maintenance fiabilité qualité

Thème

Etude et optimisation de l'usure en tournage

(Cas des outils en carbures métalliques)

Présenté par :

NACERI Oussama

et

BENCHERIF Abdesslem

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
S SENHADJI	MCB	IMSI-Univ. D'Oran2	Présidente
F BELARIFI	Pr	IMSI-Univ. D'Oran2	Encadreur
Y DJEBLI	MAA	IMSI-Univ. D'Oran2	Examineur

Année 2020/2021

Remerciements

*Nos remerciements s'adressent en premier lieu à **ALLAH** le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donnée durant ces longues années.*

*Nous exprimons nos vifs remerciements, notre profonde gratitude et notre reconnaissance à notre encadreur Mr Le professeur **BELARIFI FARID** qui nous a fait l'honneur de diriger ce travail et pour ses conseils, ses remarques pertinentes et surtout sa disponibilité et ses orientations.*

Nous remercions les membres de jury d'avoir bien voulu examiner notre travail.

En fin nous remerciements vont à nos familles pour leur soutien morale et financière durant cette formation.

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que dieu les protège.

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis, collègues d'étude.

ABDESSLAM

Dédicace
Pour ma mère Zahia ...seulement

OUSSAMA

Sommaire

Liste des figures et des tableaux.....	7
Nomenclature et symboles	10
Introduction générale.....	12

Chapitre 1 : Théorie de la coupe

1. Introduction.....	14
2. Historique.....	14
3. Principe de la coupe :.....	16
3.1.1. Paramètres de coupe en tournage :.....	16
3.1.2. Vitesse de coupe V_c	16
3.1.3. Vitesse d'avance V_f ou avance par tour f	17
3.2 Caractéristiques géométriques de l'outil	18
3.3 Efforts de coupe en tournage	18
3.3.1 Composantes de l'effort de coupe	19
4. Température de coupe et lubrification	20
4.1 Généralités sur l'usinage des matériaux métalliques :.....	20
4.2 Le fraisage :.....	21
4.2.2 Différents types des fraiseuses:	21
4.2.3 Procédés de fraisage :.....	23
4.3 Perçage :	24
4.4 Le tournage :.....	26
4.4.1 Principe de tournage :	26
4.4.2 Principe de la coupe en tournage :	26
5. Lubrification :.....	30
5.1 Conséquence de l'augmentation de température	31
6. Modélisation analytique de coupe de métaux :	31
6.1 Principe physique de la coupe:	31
6.2.1 Modèle de Merchant (1940-1945)	32
6.2.2 Théorie d'Albrecht	33
6.2.2.1 Détermination des efforts.....	34
6.2.2.2 Modélisation analytique de la coupe en UGV	35
6.2.3 Modèle de Gilormoni.....	35

6.2.4 Modèle de Molinari [11].....	35
6.2.4.1 Modélisation numérique de la coupe en UGV [12].....	35
7. Conclusion.....	36

Chapitre 2 : Usure des outils de coupe

1. Introduction	37
2. Généralités sur l'usure des outils	37
3. Géométrie des outils de coupe.....	38
3.1. Généralités	38
3.2. Les faces de l'outil	38
3.3. Angles de l'outil	39
4. forme d'usure	40
4.1. Définition.....	40
4.2. Phénomènes provoquant l'usure	41
4.3. Phénomènes mécaniques	41
4.3.1. Usure par adhésion mécanique	41
4.3.2. Usure par abrasion mécanique	42
4.3.3. Usure par déformation plastique.....	43
4.3.4. Usure par fissuration	43
4.4. Phénomène physico-chimiques	43
4.4.1 Usure par diffusion.....	43
4.4.2. Usure par corrosion.....	44
5. Type d'usure des outils.....	44
5.1. Usure en dépouille	44
5.2. Usure en entaille	45
5.3. Usure en cratère	46
5.4. Ecaillage de l'arête de coupe	46
5.5. Rupture de la plaquette	47
5.6. Arêtes rapportées	47
5.7. Déformation plastique	48
5.8. Fissurations de l'arête de coupe ou usure en peigne.....	48
6. Modèles d'usure des outils de coupe.....	48
6.1. Influence des paramètres de coupe sur l'usure	49
6.2. Modèle de Taylor.....	49

6.3. Modèle de Gilbert (modèle de TAYLOR généralisé)	52
6.4. Lois d'usure d'outil mesurées par des essais d'usinabilité	52
6.5. Modèle de COLDING	54
6.6. Modèle de KONING-DEPIEREUX (1969)	55
7. Techniques de la mesure de l'usure	56
7.1. Critères d'usure d'outil utilisés pour arrêter un essai (ISO 3685)	56
7.2. Critères d'usure.....	56
7.3. Point de vue pratique	57
8. Conclusion.....	60

Chapitre 3

Modélisation et optimisation expérimentale de l'usure

1. Introduction.....	61
2. Méthodologie d'analyse.....	61
3. Résultats expérimentaux	63
4. Extraction de la fonction expérimentale	65
4.1. Détermination des paramètres m , n et q	65
4.2. Détermination du paramètre K et de l'équation expérimentale.....	68
5. Variation de la fonction expérimentale.....	71
5.1. Variation de la fonction pour une avance fixée.....	72
5.2. Variation de la fonction pour une profondeur de passe fixée.....	73
5.3. Variation de la fonction pour une vitesse de coupe fixée.....	74
5.4. Discussion des résultats	76
6. Conclusion	77
Conclusion générale	78
Références bibliographiques	79

Liste des figures et des tableaux

Liste de figures

Chapitre 1 :

Figure 1.1 : l'opération de fraisage	15
Figure 1.2 : l'opération de tournage.....	15
Figure 1.3:les mouvement de la coupe en tournage[4]	17
Figure 1.4 :l'avance f dans cas de tournage [4]	18
Figure1. 5 : Géométrie de l'outil - Cas d'une plaquette rapportée:(1)- sans rayon, (2)- avec rayon, (3)- angle de coupe et de dépouille [4].....	18
Figure 1.5 :l'efforts de coupe en tournage [4]	19
Figure 1.6 : Illustrations des opérations d'usinage : (a) le chariotage, (b) le fraisage et (c) le perçage [1].....	20
Figure1.7 :Fraiseuses universelles [6]	22
Figure 1.8 : Fraiseuses spéciales [6].....	22
Figure 1.9 : Fraisage en bout [7]	23
Figure 1.10 : Fraisage en roulant [7]	24
Figure 1.11 : Fraisage combiné	24
Figure 1.12 :perçage. [9]	25
Figure 1.13: principe de perçage, [10]	25
Figure 1.14 : Configuration de la coupe [3]	26
Figure 1.15 : les mouvement de la coupe [500]	27
Figure 1.16 : Opérations de base en tournage [10]	29
Figure 1.17: : Décomposition d'un usinage. [16].....	30
Figure 1.18 :répartition de la température [333]	31
Figure 1.19:Modélisation de la coupe Modèle de Merchant [14]	33
Figure 1.20 :Définition des efforts mis en jeu selon Albrecht [15].....	33

Liste des figures

Chapitre 2 :

Figure 2.1 représentation de la géométrie de l'outil de coup [17].....	38
Figure 2.2 les différentes faces d'outil [17].....	39
Figure 2.3 Angles du taillant (outil en main).....	39
Figure 2.4 Angles du taillant (outil en travail).....	40

Figure 2.5 Diagramme d'usure en usinage.[18].....	41
Figure 2.6 Processus d'usure par adhésion mécanique.[19].....	41
Figure 2.7 Processus d'usure par abrasion.[19].....	42
Figure 2.8 Processus d'usure par abrasion.[19].....	43
Figure 2.9 Processus d'usure par oxydation.[19].....	44
Figure 2.10 Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil.[19]	44
Figure 2.11 l'usure en dépouille [19].....	45
Figure 2.12 l'usure en entaille [19].....	45
Figure 2.13 l'usure en cratère [19].....	46
Figure 2.14 l'écaillage de l'arête [19].....	47
Figure 2.15 la rupture de la plaquette [19].....	47
Figure 2.16 l'arête rapportée [19].....	47
Figure 2.17 la déformation plastique [19]	48
Figure 2.18 la fissuration de l'arête [19].....	48
Figure 2.19 Modèle de Taylor [23].....	50
Figure 2.20 sens de variation des courbes si f , a_p augmente [23].....	51
Figure 2.21 Représentation graphique des différents modèles.....	55

**Liste des figures
chapitre 3 :**

Figure 3.1 représentation d'une fonction empirique.....	62
Figure 3.2 représentation graphique de l'évolution de l'usure.....	64
Figure 3.3 Variation de l'usure en fonction de VC.....	65
Figure 3.4a Variation de l'usure en fonction de a_p pour $f=0.2\text{mm/tr}$	66
Figure 3.4b Variation de l'usure pour en fonction de a_p , pour $f=0.3\text{mm/tr}$	66
Figure 3.5a Variation de l'usure en fonction de l'avance pour $a_p=2\text{mm}$	67
Figure 3.5b Variation de l'usure en fonction de l'avance pour $a_p=4\text{mm}$	67
Figure 3.6 Variation de l'usure pour $f=0.1\text{mm/tr}$	72
Figure 3.7 Variation de l'usure pour $f=0.2\text{mm/tr}$	72
Figure 3.8 Variation de l'usure pour $f=0.3\text{mm/tr}$	73
Figure 3.9 Variation de l'usure pour $a_p=2\text{mm}$	73
Figure 3.10 Variation de l'usure pour Variation de l'usure pour $a_p=3\text{mm}$	74
Figure 3.11 Variation de l'usure pour $a_p=4\text{mm}$	74
Figure 3.12 Variation de l'usure pour VC=100m/mn.....	75

Figure 3.13 Variation de l'usure pour $V_c=150\text{m/mn}$	75
Figure 3.14 Variation de l'usure pour $V_c=200\text{m/mn}$	76

**Listes des tableaux
chapitre 2 :**

Tab 2.1 Valeurs du coefficient K	51
Tab 2.2 valeurs indicatives du coefficient de loi généralisé de Taylor [23].....	53
Tab 2.3 choix des conditions de coupe [23].....	54
Tab 2.4 valeur de vitesse [23].....	54
Tab 2.5 valeurs KT en fonction de f	59
Tab 2.6 critère usuel et la rugosité	59

**Liste des tableaux
Chapitre 3 :**

Tab 3.1 Paramètres expérimentales et valeurs de l'usure.....	64
Tab 3.2 Equation des courbes des tendances des différents essais.....	67
Tab 3.3 Valeurs maximales de l'usure	76

Nomenclature et symboles

a_p	Profondeur de passe	[mm]
A_α	Face de dépouille (α : "alpha")	[-]
A_γ	Face de coupe (γ : "gamma")	[-]
C_v	Constante dépendant du matériau à usiner $10^4 < C_v < 10^{14}$.	[-]
D	Diamètre de la pièce	[mm]
f	Avance	[mm.tr-1]
F_c	L'effort de coupe	[N]
K	Coefficient qui tient compte de l'usinabilité de la matière	[-]
K_B	Largeur du cratère	[mm]
K_M	Distance du centre du cratère / pointe initiale de l'outil [mm]	[mm]
K_T	Usure en cratère	[-]
K_T	Profondeur d'un cratère	[mm]
M	La masse	[Kg]
M_a	Mouvement d'avance	[mm/min]
M_c	Mouvement de coupe	[mm/min]
M_f	Mouvement d'avance	[Mm/min]
M_p	Mouvement de pénétration	[mm/min]
n	Constante dépendant du matériau d'outil $-8 < n < -1$.	[-]
N	Vitesse de rotation de la broche	[Tr.min-1]
n, p, q	Valeurs indicatives des coefficients de la loi généralisée de Taylor	[-]
r	Rayon de bec	[mm]
R_s	La Résistance spécifique à la rupture par compression	[MPa]
s	Surface de contact	[mm ²]
S	Arête de coupe principale	[-]
S	Section du copeau définie par l'avance f et la profondeur de passe a_p	[-]
S_v	Profondeur entre l'arête initiale et la pointe de l'outil usé	[-]
T	La durée de vie d'outil	[Min]
T	Temps d'usinage	[Min]

V	Représente le volume ou le débit volumique	[Dm ³]
V ₀	Vitesse de référence	[mm/min]
VB	Usure en dépouille	[-]
V _B	Hauteur de l'usure en dépouille	[mm]
V _{BC}	Profondeur entre l'arête initiale et la zone usée	[mm]
V _c	Vitesse de coupe	[m.min ⁻¹]
V _{c20} , VB ₀	Notations indicées	[-]
V _f	La vitesse d'avance notée	[mm.min ⁻¹]
V _n	Profondeur d'entaille par rapport à l'arête de coupe initiale	[mm]
VN	Usure en entaille	[-]
w, x, y, z	Des variable	[-]
α	Angle de dépouille	[rd]
β	Angle de taillant	[rd]
Γ	Angle de coupe	[rd]
Θ	La température de coupe	[C°]
γ	Angle de cratérisation	[Rd]
λ	Lettre minuscule grecque LAMBDA	[-]
μ	Lettre minuscule grecque MU	[-]
ρ	La masse volumique	[Kg.m ³]
Φ	L'angle de cisaillement	[Degré °]
ω	Vitesse angulaire	[Rad. s ⁻¹]

Introduction générale

Les opérations d'usinage constituent une part importante de la fabrication des composants mécaniques avec environ 15 % de la production mondiale. En raison de cette grande importance économique, une grande activité de recherche a été menée ces dernières années afin d'optimiser le processus de coupe et d'accroître la productivité tout en diminuant les coûts.

Les procédés d'usinage par enlèvement de matière sont nombreux, comme le fraisage, le perçage, ou le tournage. L'opération de tournage permet d'usiner des pièces cylindriques, cubiques ou excentrées en fonction de la cinématique de la machine (troisième axe etc.). L'opération de fraisage (coupe discontinue) est utilisée pour usiner des pièces dont les formes ne sont pas de révolution. Nos travaux ont pour but de déterminer l'influence des différents paramètres de coupe sur la précision d'état de surface de pièces obtenus par usinage sur tour. L'étude présentée traite donc du cas du tournage, en coupe continue, afin de cerner l'influence des paramètres dans un contexte plus simple que celui du fraisage, où la coupe est discontinue. Il est à remarquer que la coupe des métaux génère des phénomènes tel que les efforts de coupe, l'élévation de la température de contact et l'usure qui représente à lui seul un ensemble complexe de phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission de débris avec perte de masse, de cote, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces. L'usure comporte une part importante de réactions chimiques ; des couches superficielles chimiquement inertes peuvent parfois se révéler plus résistantes au frottement que des couches dures, surtout en présence de milieux agressifs. Elle est généralement combattue à cause de ses effets négatifs mais elle présente aussi des aspects favorables tels que l'affûtage des outils, la finition d'une surface par rectification. Dans ce contexte nous traitons dans ce mémoire une approche de modélisation et d'optimisation de l'usure par variation des conditions de coupes en tournage d'une opération de chariotage. Les résultats expérimentaux effectués dans le cadre de travaux de recherche à l'ENPO, pour un mémoire de magistère sont la base de cette étude. La méthode choisie est celle de l'analyse dimensionnelle des essais expérimentaux.

Le mémoire est organisé en trois chapitres distincts :

Le chapitre 1, traite de la théorie de la coupe où l'on retrouve les différentes définitions relatives aux conditions de coupes ainsi que les différents modèles qui traitent la coupe des métaux.

Le chapitre 2, met en évidence le phénomène de l'usure des outils de coupes et les différents modèles ayant traités ce sujet, en ce qui concerne le chapitre 3, il est consacré à la méthode grapho analytique pour optimiser les conditions de coupe à l'usure d'une opération de chariotage.

Chapitre 1

Théorie de la coupe

1. Introduction

Les opérations d'usinage constituent une part importante de la fabrication des composants mécaniques avec environ 15 % de la production mondiale. En raison de cette grande importance économique, une grande activité de recherche a été menée ces dernières années afin d'optimiser le processus de coupe et d'accroître la productivité tout en diminuant les coûts, [1].

Les procédés d'usinage par enlèvement de matière sont nombreux, comme le fraisage, le perçage, ou le tournage. L'opération de tournage permet d'usiner des pièces cylindriques, cubiques ou excentrées en fonction de la cinématique de la machine (troisième axe etc.). L'opération de fraisage (coupe discontinue) est utilisée pour usiner des pièces dont les formes ne sont pas de révolution. Nos travaux ont pour but de déterminer l'influence des différents paramètres de coupe sur la précision d'état de surface de pièces obtenus par usinage sur tour. L'étude présentée traite donc du cas du tournage, en coupe continue, afin de cerner l'influence des paramètres dans un contexte plus simple que celui du fraisage, où la coupe est discontinue.

2. Historique

2000 ans avant Jésus Christ, la plus ancienne machine-outil jamais découverte est un tour. A l'âge du bronze, les artisans se servaient de tours à arc. Plus tard, le tour de potier sera découvert.

Vers l'an 1500, Léonard de Vinci propose des solutions basées sur du tournage à mouvement continu. Son tour, comme beaucoup de ses inventions, est en avance sur son époque.

Il faudra attendre le XIX^{ème} siècle pour que les bases de la mécanique moderne poursuivent cette évolution et débouchent sur le tour automatique.

Historiquement, les premières machines ont donc été des tours pour la fabrication de pièces de révolution. Les tours actuels sont toujours basés sur le même principe. Par contre, parmi les autres machines, certaines ont évolué et d'autres ont disparu. Par exemple, les machines à raboter et les limeuses (rebaptisées ultérieurement étaux limeurs) ont quitté les ateliers, remplacées par les fraiseuses. A la fin des années 70, l'apparition des premières commandes numériques a révolutionné le monde de la machine-outil. Les types de machines (tours -

fraiseuses) n'ont pas fondamentalement changé, mais les temps de reconfiguration de ces machines ont été considérablement réduits par le remplacement des butées réglables (mécaniques ou électromécaniques) par des butées logicielles. L'utilisation des commandes numériques a également permis d'augmenter la complexité des formes réalisées grâce à la combinaison de mouvements suivant plusieurs axes. Comme indiqué par la figure 1.1.

Les machines sont classées en deux catégories :

Fraisage : L'outil tourne, comme indiqué dans la figure 1.1. La pièce se déplace par rapport à l'outil. Cela permet de réaliser des formes planes, des moules...



Figure 1.1 : l'opération de fraisage [1]

Tournage : La pièce tourne, l'outil se déplace par rapport à la pièce : pour réaliser des pièces de révolution.

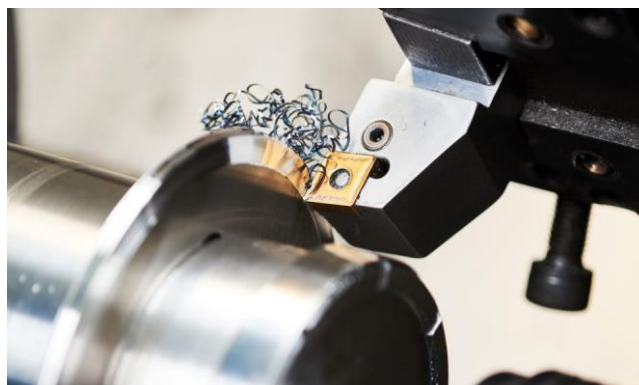


Figure 1.2 : l'opération de tournage [1]

Bien entendu, des industriels fabriquent des tours, où les outils peuvent tourner, ou des centres de fraisage où les pièces peuvent être entraînées en rotation... ce sont des machines hybrides, mixtes, ou machine multiaxe.

3. Principe de la coupe :

3.1.1. Paramètres de coupe en tournage :

Les paramètres de coupe dans le cas du tournage sont illustrés sur la figure 1.8 L'usinage est conditionné par ces différents paramètres dont les réglages sont liés d'une part à la nature de l'opération (ébauche, demi-finition, finition), et d'autre part à l'optimisation du procédé concernant le couple outil-matière (COM), abaques, ou déterminés à partir de logiciels métiers. On distingue dans les paramètres de coupe, d'une part, les grandeurs qui caractérisent les déplacements de l'outil et de la pièce usinée (paramètres de coupe cinématiques) et d'autre part, les valeurs des surépaisseurs d'usinage et des dimensions de coupe (paramètres de coupe géométriques), [2].

3.1.2. Vitesse de coupe V_c

La vitesse de coupe, comme indiqué par la figure 1.2, constitue le premier paramètre de l'opération de tournage, car elle impose la cinématique et la dynamique du procédé, c'est à dire la rotation de la pièce. Sur un tour, la pièce est entraînée à une certaine vitesse notée ω (rad.s⁻¹) ou N (tr.min⁻¹) par l'intermédiaire de la broche et du porte-pièce. Pour une opération donnée, le point d'usinage se situant sur un diamètre D (mm), la vitesse relative de la pièce ou vitesse de coupe V_c (m.min⁻¹) comme indiqué par les figure 1.1, en ce point se calcule de la façon suivante:

$$V_c = \frac{d}{2} \times \omega \quad (1.1)$$

La fréquence de rotation N de la pièce s'exprime alors par

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi D} \quad (1.2)$$

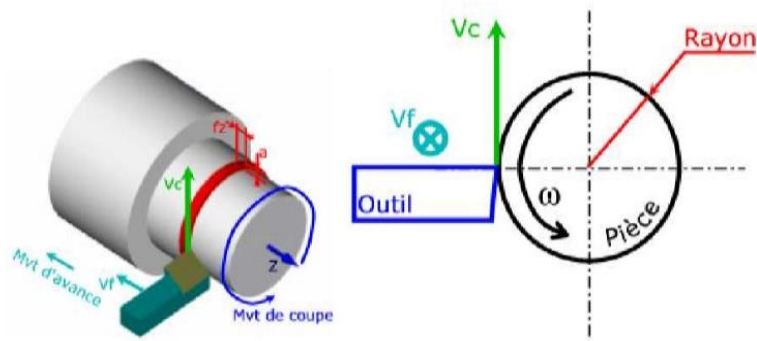


Figure 1.3:les mouvement de la coupe en tournage[1]

Il est à noter que la vitesse de rotation est inversement proportionnelle au diamètre du point générateur, donc dans le cas de très petits diamètres, la vitesse de rotation augmente très rapidement à vitesse de coupe constante. De plus la vitesse de coupe n'est constante que si la vitesse de broche et le diamètre de la pièce demeurent inchangés. Pour le dressage par exemple la vitesse de coupe varie continuellement, mais sur un grand nombre de tours modernes, la vitesse de broche varie pour assurer une vitesse de coupe constante.

Le choix de la vitesse de coupe se fait généralement en fonction des matériaux de la pièce et de l'outil, des paramètres d'avance, de la profondeur de passe, de la lubrification et de la durée de vie souhaitée des outils.

3.1.3. Vitesse d'avance V_f ou avance par tour f

La vitesse d'avance notée V_f ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) correspond à la vitesse de déplacement de l'outil par rapport au bâti. L'avance par tour f ($\text{mm} \cdot \text{tr}^{-1}$) quant à elle correspond à la valeur du déplacement de l'outil pour un tour de la pièce, comme indiqué par les figure 1.3. Le choix de f peut se déduire de tables, Elle est prise comme référence car elle conditionne la qualité de la surface usinée et le chargement de l'outil L'avance influence également l'épaisseur des copeaux et leur mode de segmentation La relation qui lie ces données s'exprime par la formule suivante :

$$V_f = N \times f \quad (1.3)$$

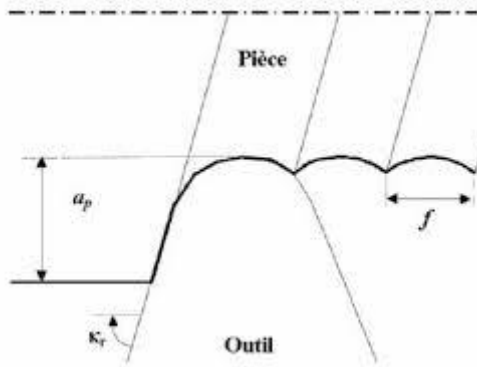


Figure 1.4 :l'avance f dans cas de tournage [9]

3.2 Caractéristiques géométriques de l'outil

Les principales caractéristiques géométriques de l'outil ont un rôle important dans la formation et l'évacuation du copeau. L'angle de coupe, comme indiqué par les figures 1.4, a une influence considérable sur le comportement du matériau usiné dans la zone de formation du copeau et sur la longueur de contact outil/copeau, [3-5].

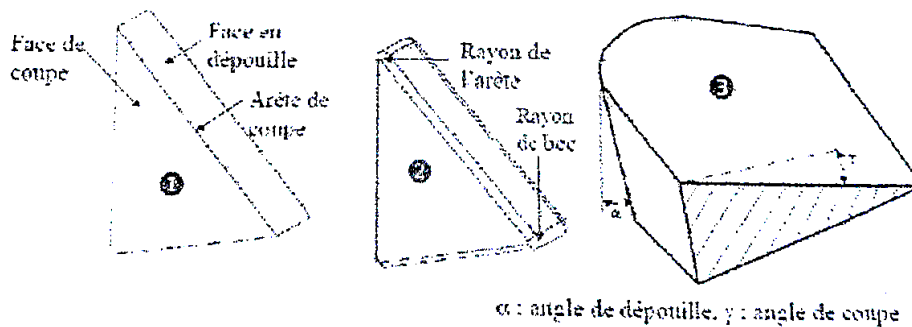


Figure1. 5 : Géométrie de l'outil - Cas d'une plaquette rapportée:(1)- sans rayon, (2)- avec rayon, (3)- angle de coupe et de dépouille [4]

3.3 Efforts de coupe en tournage

L'effort de coupe F_c dépend de la résistance spécifique à la rupture par compression R , de la matière travaillée et de son usinabilité, des dimensions du copeau, de l'outil utilisé ainsi que du mode de travail [5] Généralement, l'effort de coupe est calculé par la relation suivante :

$$F_c = K \times S \times R_s \quad (1.3)$$

Avec :

R : la Résistance spécifique à la rupture par compression,

S : Section du copeau définie par l'avance f et la profondeur de passe a_p , soit

$$S = a_p \times f \quad (1.4)$$

K : Coefficient qui tient compte de l'usinabilité de la matière, de l'épaisseur du copeau, (il est plus fort en finition qu'en ébauche) et de la géométrie de l'outil de coupe. On adopte généralement les valeurs suivantes.

K=2,5 à 4 pour les aciers et **K**=4 à 5 pour les fontes.

3.3.1 Composantes de l'effort de coupe

Les composantes de l'effort de coupe, comme indiqué sur la figure 1.6, l'effort d'avance et l'effort de pénétration sont donnés par les relations suivantes :

$$F_f = (0.2 \text{ à } 0.3)F_c \quad (1.5)$$

$$F_{ap} = (0.4 \text{ à } 0.5)F_c \quad (1.6)$$

Etant donné que les trois efforts forment un trièdre trirectangle alors:

$$\sqrt{(0.25 \times F_c)^2 + (0.45 \times F_c)^2 - F_c^2} \cong 1.12 F_c \quad (1.7)$$

Généralement il est admis que : $F \approx F_c$

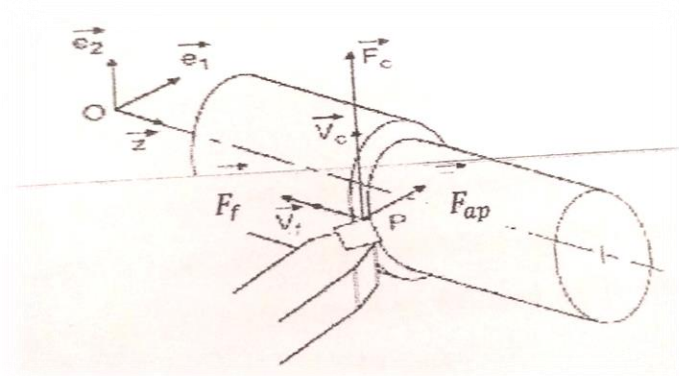


Figure 1.6 : l'efforts de coupe en tournage [4]

4. Température de coupe et lubrification

4.1 Généralités sur l'usinage des matériaux métalliques :

Le terme usinage concerne tout procédé de fabrication par enlèvement progressif de la matière d'un bloc (brut), à l'aide d'outils comportant une ou plusieurs arêtes. La coupe avec une seule arête est utilisée par exemple dans l'opération de tournage, (voir Figure 1.1(a)). La pièce tourne autour de son axe et l'outil de coupe avance dans la matière. Le tournage s'effectue à l'aide d'un tour et produit des pièces de forme cylindrique. Les opérations de tournage telles que le chariotage, le rainurage, et le filetage permettent de réaliser une grande variété de caractéristiques telles que les surfaces planes et les contours complexes. Il existe d'autres procédés de coupe qui ne nécessitent pas une rotation de la pièce comme le rabotage.

Dans le cas de la coupe avec plusieurs arêtes, la pièce usinée avance ou reste fixe et l'outil effectue un mouvement de rotation et translation pour créer des formes variées. C'est le cas par exemple des opérations de fraisage (voir Figure 1.1(b)). L'outil de coupe comporte dans le cas d'une fraise monobloc plusieurs dents, ou plaquettes dans le cas d'une fraise mère. Un autre procédé qui reprend le même principe est le perçage. Dans ce procédé, l'outil rotatif avance verticalement dans la pièce fixe pour créer un trou, Figure 1.1(c). Les fraiseuses peuvent également effectuer des opérations de perçage de type alésage. Les travaux de cette thèse nécessitent une connaissance et une compréhension préalable de la complexité du chargement appliqué sur l'outil de coupe lors de l'usinage. Il est donc important d'étudier les différentes origines de ce chargement et son effet sur la pièce usinée et l'outil de coupe. Dans ce qui suit, nous nous intéresserons à l'opération de tournage sous sa forme simplifiée (configuration en coupe orthogonale), [1].

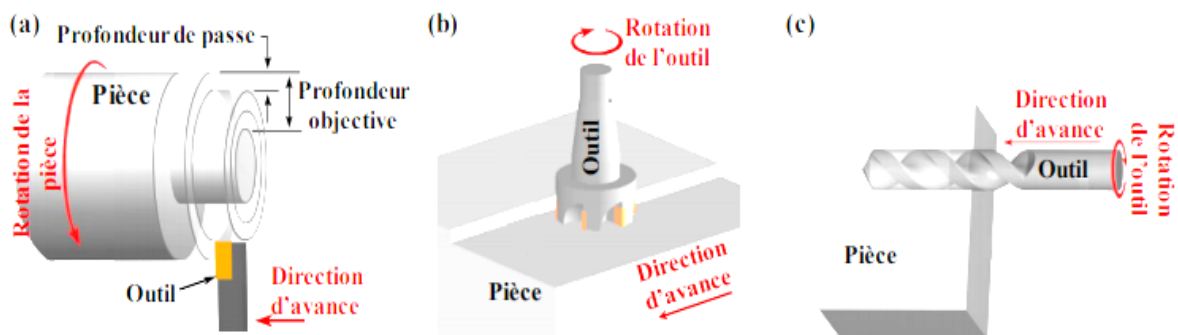


Figure 1.7 : Illustrations des opérations d'usinage : (a) le chariotage, (b) le fraisage et (c) le perçage [1].

4.2 Le fraisage :

4.2.1 Définition :

L'opération de fraisage est sans aucun doute l'une des plus polyvalentes, permettant l'obtention de surfaces planes précises et aussi dans le cas des fraiseuses à commande numérique, de profils complexes et de surfaces 3D. Dans ce type de mise en forme, l'outil est entraîné en rotation par la broche de la machine, et un déplacement relatif est effectué entre la pièce et l'outil de coupe afin de produire sur la pièce la forme désirée. Les fraiseuses ont supplanté certaines machines (raboteuses, étaux limeurs) pour l'usinage de surfaces planes. Ces machines peuvent également servir pour des opérations de tournage. L'outil, une fraise, est fixé dans la broche et est animé d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe). Il peut se déplacer en translation par rapport à la pièce suivant trois directions. On note qu'il existe plusieurs types de fraiseuses [6].

4.2.2 Différents types des fraiseuses :

Le fraisage s'effectue sur différents types de machines.

4.2.2.1 Fraiseuses universelles :

Cette machine, comme indiqué par Figure 1.6. Sert principalement à usiner des pièces prismatiques. La pièce est fixée dans l'étau. L'outil est mis en rotation par le moteur de broche, il suit une trajectoire qui interfère avec la pièce. L'outil est muni d'une arête coupante, il en résulte un enlèvement de matière : les copeaux, [6].

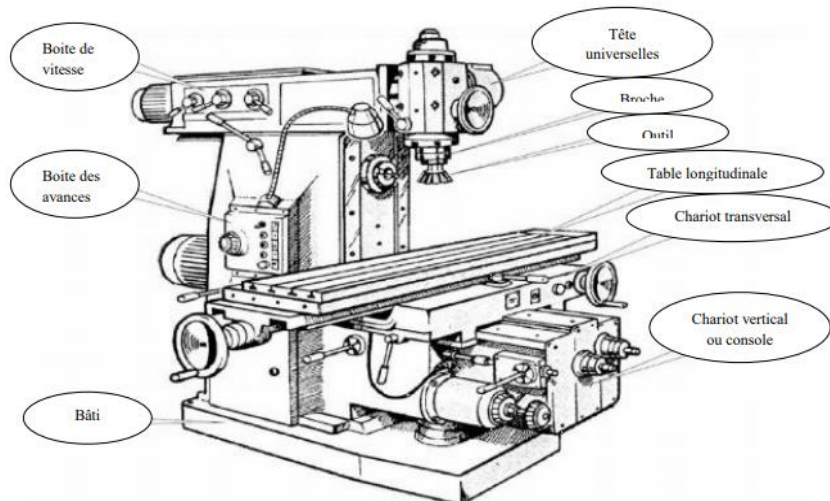


Figure 1.8 : Fraiseuses universelles [6]

4.2.2.2 Fraiseuses spéciales: (à reproduire, multibroches, etc.).

Les fraiseuses à reproduire permettent de reproduire suivant deux ou trois axes la forme représentée par un modèle (ou gabarit). Un pantographe permet une reproduction en réduction ou avec symétrie. (comme indiqué par Figure 1.7). Un palpeur est assujéti, par un dispositif hydraulique ou électrique, à suivre le profil d'un gabarit et à transmettre ses déplacements à une table porte pièce. Ces machines sont utilisées essentiellement pour les travaux à l'unité (outillages de presse, coquilles métalliques, etc.),[6].

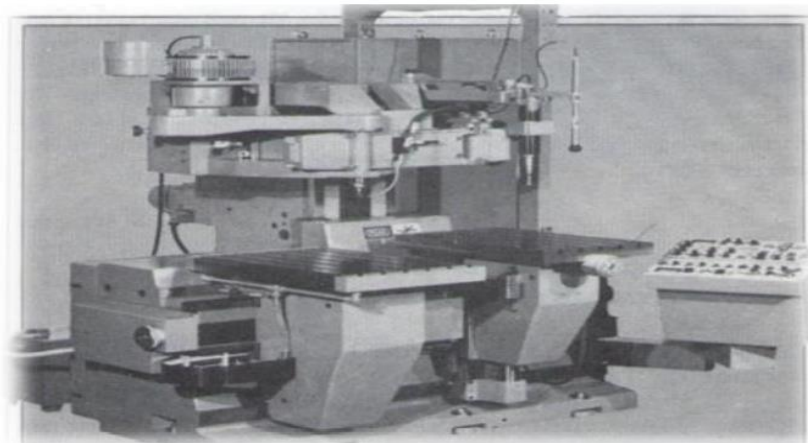


Figure 1.9 : Fraiseuses spéciales [6]

4.2.3 Procédés de fraisage :

4.2.3.1 Fraisage en bout :

L'axe de la fraise est placé perpendiculairement à la surface à usiner (Figure 1.8). La fraise coupe avec son diamètre, mais aussi avec sa partie frontale. Les copeaux sont de même épaisseur, ainsi la charge de la machine est plus régulière. La capacité de coupe est supérieure à celle réalisée par le fraisage en roulant. La qualité de l'état de surface est meilleure [7].

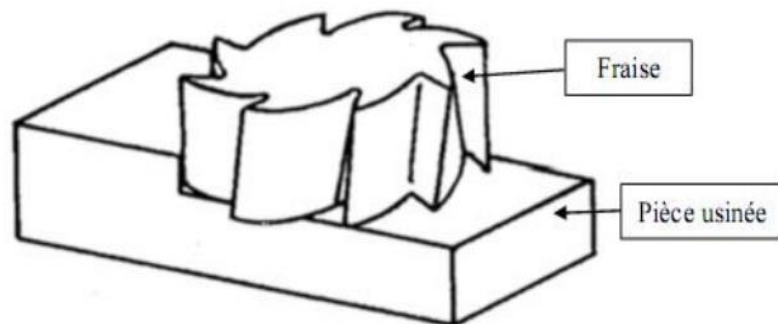


Figure 1.10 : Fraisage en bout [7]

4.2.3.2 Fraisage en roulant :

Pour ce type de fraisage en roulant, l'axe de la fraise est placé parallèlement à la surface à usiner. La fraise coupe avec son diamètre, comme indiqué par Figure 1.9. La charge de la machine en est irrégulière, surtout lors de l'emploi de fraises à denture droite. Les à-coups

provoqués par cette façon de faire donnent une surface ondulée et striée. Pour pallier ces défauts, on utilisera une fraise à denture hélicoïdale.

L'amélioration enregistrée s'explique ainsi : la denture est chargée/déchargée progressivement [7].

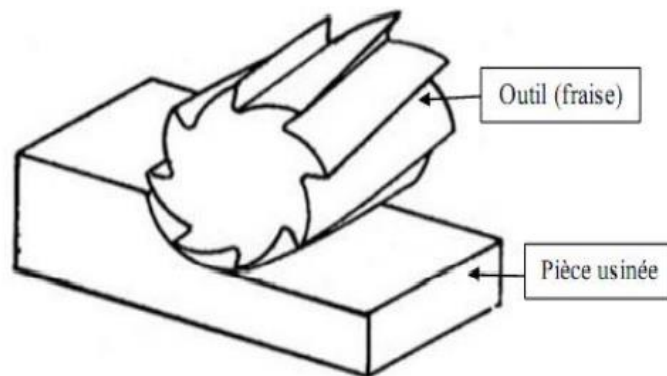


Figure 1.11 : Fraisage en roulant [7]

4.2.3.3 Fraisage combiné :

Pour le fraisage combiné, la fraise coupe avec son diamètre et sa partie frontale, comme indiqué par Figure 1.10, [8].

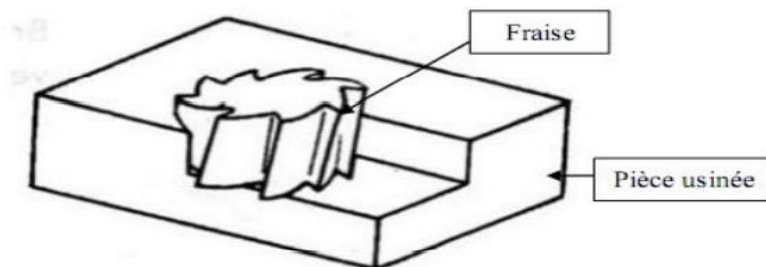


Figure 1.12 : Fraisage combiné

4.3 Perçage :

4.3.1 Définition :

Le perçage est un usinage consistant à exécuter des surfaces cylindriques intérieures (trous) dans une pièce, comme indiqué par figure 1.11. Ce trou peut traverser la pièce de part en part ou bien ne pas déboucher. On parle alors de trou borgne.

Ce trou peut être effectué à l'aide d'outils rotatifs. L'outil de coupe, appelé foret. Le foret, est animé d'un mouvement de rotation continu et d'un mouvement de déplacement longitudinal. C'est une opération par enlèvement de matière. Ce trou peut servir à faire passer une pièce (un arbre, un tube), un fluide, ou peut encore être taraudé pour recevoir une vis. [9]

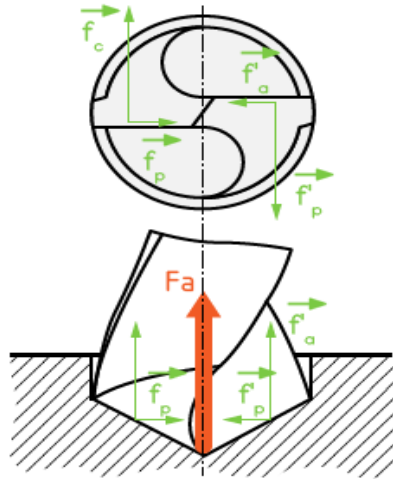


Figure 1.13 :perçage. [9]

4.3.2 Principe perçage :

L'opération de perçage nécessite deux mouvements simultanés, comme indiquè sur la figure1.12:

- Le mouvement de coupe **Mc** : donné par la rotation de la broche.
- Le mouvement d'avance **Ma** : donné par la translation de Foureau.

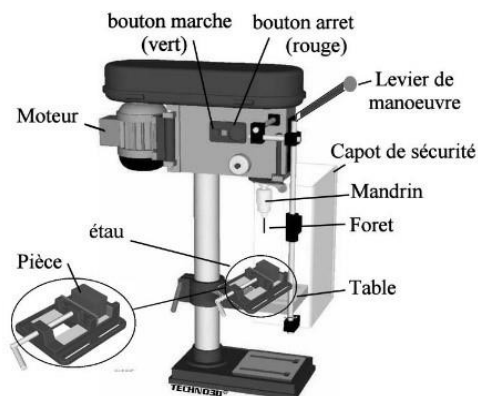


Figure 1.14: principe de perçage, [10]

4.4 Le tournage :

4.4.1 Principe de tournage :

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé, l'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce.

4.4.2 Principe de la coupe en tournage :

Lors d'un usinage par enlèvement de matière, on se retrouve dans la majorité des cas dans la configuration comme indiqué par la figure 1.13, [8] :

- Une lame d'outil pénètre dans la matière et enlève un copeau
- L'outil suit une trajectoire par rapport à la pièce à usiner, où les mouvements sont assurés par les éléments constitutifs de la machine-outil.

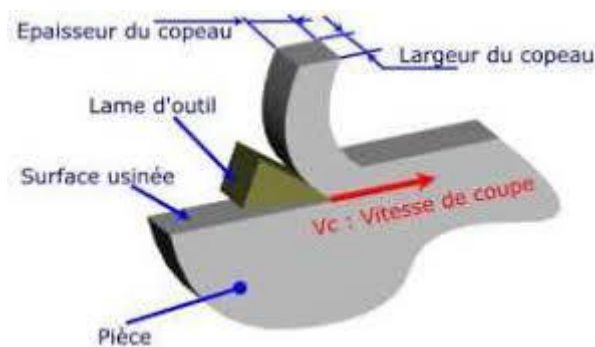


Figure 1.15 : Configuration de la coupe [3]

Un examen plus approfondi du mécanisme de la coupe conduit à observer qu'il procède grâce à trois mouvements principaux perpendiculaires entre eux, comme indiqué par la figure 1.14.

- Mouvement de coupe << MC >> : C'est un mouvement qui participe directement au détachement de la matière sous forme de copeaux pendant la course de travail.
- Mouvement d'avance << Mf >> : C'est le mouvement qui a pour but de décaler latéralement une quantité << f >> dite avance, pour que l'outil puisse à la nouvelle course de travail détacher d'autres copeaux.

- Mouvement de pénétration << Mp >> : C'est le mouvement qui détermine l'épaisseur de la couche de métal à enlever à chaque opération qui prend le nom de passe.

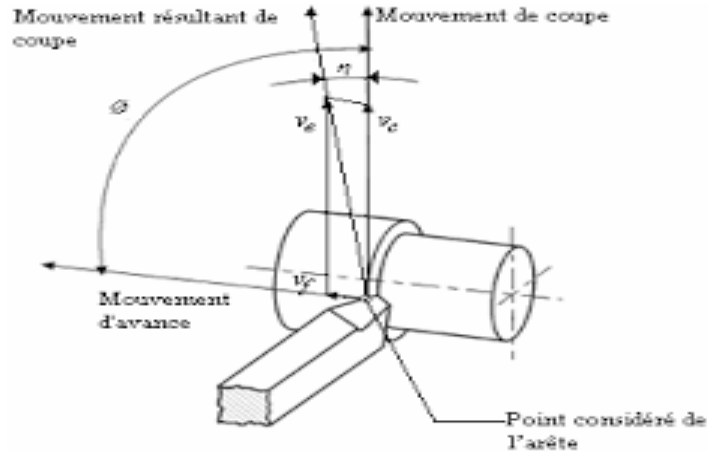


Figure 1.16 : les mouvements de la coupe [9]

Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe (vitesse de coupe V_c) et le mouvement d'avance (vitesse d'avance V_f). La fréquence de rotation de la broche est donnée par l'équation suivante [11].

$$N = \frac{V_c}{\pi \cdot \phi} \quad (1.8)$$

$$V_f = N \times f \quad (1.9)$$

ϕ : l'angle de direction d'avance.

4.4.3 Les opérations de base en tournage:

Extérieur, on peut souvent dissocier les pièces complexes en profils de coupe élémentaires pour le choix des outils et des paramètres de coupe.

Pour faciliter le choix du type d'outil, on peut considérer qu'il existe, en tournage, quatre opérations de base (figure 1.15) :

- Tournage longitudinal, ou chariotage (figure 1.17.1)
- Dressage (figure 1.17.2)
- Tournage de cônes (figure 1.17.3)
- Contournage (figure 1.17.4)

- A. En chariotage, le mouvement d'avance (mouvement de l'outil) est une translation rectiligne parallèle à l'axe de révolution de la pièce, et cet usinage aura pour effet de réduire le diamètre de la pièce.
- B. En dressage, le mouvement d'avance est une translation rectiligne de l'outil perpendiculaire à l'axe, ce qui diminue la longueur de la pièce et génère un plan orthogonal à l'axe.
- C. En combinant les deux types de déplacements précédents (avance de l'outil en translation rectiligne oblique/axe), on génère des cônes de révolution.
- D. Enfin, en donnant à l'outil une trajectoire plane quelconque (profil de contournage), on peut obtenir une forme de révolution quelconque. Les tours à commandes numériques de contournage permettent de suivre de tels profils, définis géométriquement par des combinaisons d'éléments simples (segments, cercles...) ou analytiquement par une fonction, ou encore point par point dans le cas de profils non définis mathématiquement.

Le profil ainsi défini numériquement remplace le concept de gabarit de copiage. Sur un tour CNC, les cas précédents deviennent en fait des cas particuliers du contournage.

Ses différentes opérations correspondent à un usinage dit « de génération » ou « d'enveloppe »: la forme obtenue, à l'échelle macro géométrique, ne doit rien à la forme de l'outil qui l'a générée. En d'autres termes, la forme obtenue dépend uniquement de la trajectoire de l'outil, à la rugosité près. À l'opposé, les gorges, filetages, etc., sont obtenues par reproduction dans la pièce du profil de l'outil et sont qualifiées d'usinage « de forme ».

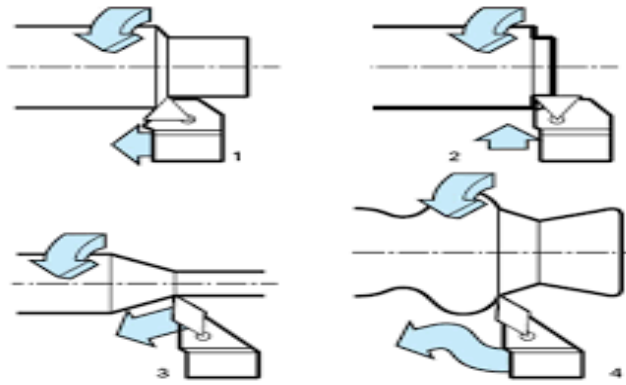


Figure 1.17 : Opérations de base en tournage [10]

4.4.4 Paramètres de coupe en tournage

Les paramètres de coupe sont, d'une part, des valeurs qui caractérisent les déplacements de l'outil et de la pièce usinée (paramètres de coupe cinématiques) et, d'autre part, les valeurs des surépaisseurs d'usinage et des dimensions de coupe (paramètres de coupe géométriques). Les conditions de coupe sont une notion plus large qui inclut les paramètres géométriques et cinématiques de coupe en plus d'autres facteurs qui influencent l'usinage tel que le matériau usiné, le matériau et la géométrie de l'outil, les fluides de coupe, l'état de la machine-outil, etc. Le préparateur choisit cette vitesse de coupe en fonction, notamment:

- Des matériaux de la pièce et de l'outil
- De la lubrification
- De la durée de vie souhaitée pour l'outil ; des valeurs des autres paramètres de coupe (avance, profondeur de passe...).

4.4.5 Dimension et type du porte-plaquette

Ce choix se fait en fonction de la direction de l'avance, la profondeur de passe, la nature de la pièce, la fixation de l'outil sur la machine et l'espace disponible. La forme de la pièce est un facteur décisif en tournage. Les opérations complexes peuvent être décomposées en différentes phases:

1. Un chariotage ;
2. Un dressage ;

3. Un tournage conique en plongée ;
4. Une remontée de cône ;
5. Une remontée d'épaulement.

Les formes rondes peuvent être assimilées à des combinaisons de 3 et 4. On cherche ensuite à trouver des combinaisons permettant de limiter le nombre d'outils tout en conservant un maximum de performances (rigidité d'outil, résistance d'arête...). Les différents types de porte-plaquette sont définis par l'angle d'orientation d'arête et l'angle de pointe de la plaquette utilisée.

Un angle de pointe aigu donne une plus grande variété de profils usinables au détriment de la résistance du bec de l'outil : en a, un outil robuste, avec un grand angle de pointe, mais des possibilités limitées en contournage; en b, un outil élancé, capable de générer des profils très variés, des formes délicates, mais avec un bec beaucoup plus fragile, [16].

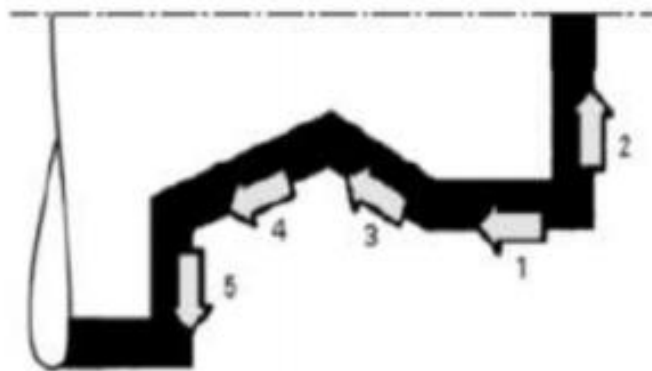


Figure 1.18: : Décomposition d'un usinage. [15]

5. Lubrification :

La formation du copeau s'accompagne d'un important dégagement de chaleur dû au frottement du copeau glissant sur la face de coupe et au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil. L'échauffement de la partie active est fonction de la vitesse de coupe V_c et croît avec elle. Par exemple, pour le tournage a sec de l'acier XC38, si V_c passe de 50 à 100 m/min, alors la température de coupe Θ passe de 600°C à 800 °C, [12].

5.1 Conséquence de l'augmentation de température

La dureté du matériau de l'outil de coupe diminue à partir de certaines températures. 500°C à 600°C pour les aciers rapides, 800°C à 900°C pour les carbures et environ 1400 °C pour les céramiques, [12].

Ces valeurs représentent les valeurs moyennes au-dessous desquelles il est bon de maintenir la température de l'outil car l'usure est d'autant plus rapide que la température de la partie active est plus élevée. Comme indiqué par la figure 1.15, illustre la répartition de la température sur la partie active de l'outil lors de l'usinage à sec d'un acier $V_c=60$ (m.min⁻¹).

Dans la zone de formation du copeau la température tend à augmenter la plasticité du métal de la pièce et par conséquent elle permet une diminution notable des efforts de coupe. En revanche elle provoque une dilatation de la pièce.

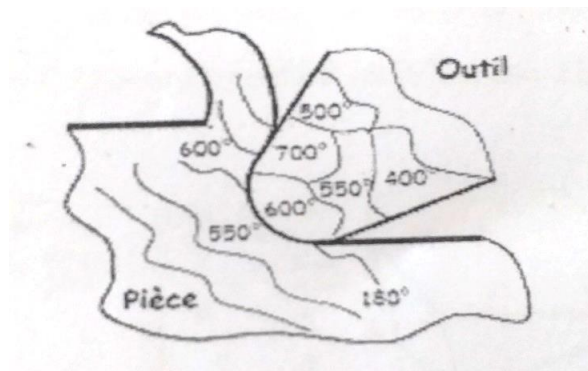


Figure 1.19 :répartition de la température [9]

6. Modélisation analytique de coupe de métaux :

6.1 Principe physique de la coupe :

L'étude de l'interaction (matériaux / procédés) en coupe implique la prise en compte d'un très grand nombre de paramètres afin d'expliquer les phénomènes qui s'y déroulent. La

compréhension n'est pas aisée parce qu'il s'agit d'un problème pluridisciplinaire faisant intervenir les sciences, [4], telles que:

- La métallurgie (transformations structurales, dislocation, fissuration...)
- La thermodynamique (échauffement, écoulement)
- La métrologie (dimensionnelle, macro et micro-géométrique, intégrité des surfaces)
- La mécanique des métaux (loi de comportements de type viscoplastique à des températures et des vitesses de déformation importantes)
- La mécanique des milieux continus (contraintes résiduelles, déformation, vitesse de déformation)
- La mécanique des solides (efforts, dynamique, vibration...).

6.2 Configurations d'usinage :

En fonction du procédé de coupe étudié, les outils mis en jeu sont différents en forme et en géométrie. Cependant, afin d'étudier la formation du copeau ou d'établir des analyses et cela quel que soit le procédé, des hypothèses simplificatrices sur la configuration d'usinage et la géométrie des outils sont établies. Selon la géométrie de l'arête de coupe, on peut considérer deux cas de la coupe soit orthogonale soit oblique, [4].

6.2.1 Modèle de Merchant (1940-1945)

Merchant est le premier à développer un modèle analytique de la formation du copeau en coupe orthogonale (1945), dans le cas d'un régime stationnaire pour construire le modèle.

Hypothèses de la théorie :

- On se place dans le cadre de la coupe orthogonale (pour se ramener à un problème plan), en régime stationnaire.
- Le rayon de bec de l'outil est nul.
- Le système machine-pièce-outil-porte outil est supposé parfaitement rigide.
- L'épaisseur du copeau est constante.
- La vitesse de coupe est choisie de façon à obtenir une formation du copeau sans zone morte.

- Zone (AB) : elle est constituée de la face de coupe. Il lui associe une résultante des efforts, notée dont l'origine se trouve au milieu de l'arc (AB).
- Zone (BC) : elle est constituée de la portion de cylindre qui forme le rayon de bec. Il la sépare encore en deux portions (BE) et (EC). La résultante des efforts sur cet arc est notée, située, elle aussi, au milieu de l'arc, en supposant que la répartition des efforts le long de (BC) est uniforme.

Chacune de ces zones a son propre coefficient de frottement, les différences étant accentuées s'il y a un copeau adhérent au cours de la coupe.

Plus l'angle de cisaillement Φ est faible, plus la quantité de métal refoulée dans le copeau est grande. Le long de (BC), en admettant que l'outil n'est pas repoussé (vérifié expérimentalement), la matière en contact doit s'écouler ! La portion qui est en contact avec (BE) est refoulée dans le copeau, et génère des contraintes qui le font s'enrouler. Celle qui est en contact avec (EC) est refoulée dans la surface usinée, ce qui explique les contraintes résiduelles en surface, [15].

6.2.2.1 Détermination des efforts

Les objectifs de cette théorie sont de montrer que seul intervient dans le calcul du coefficient de frottement outil/pièce et montrer expérimentalement qu'on ne peut pas négliger l'influence de l'expression de ce coefficient de frottement est donnée par :

$$\mu_Q = \tan \tau_Q = \frac{(F_v - P_v) + (F_v - P_v) \tan \gamma}{(F_v - P_v) + (F_f - P_f) \tan \gamma} \quad (1.10)$$

$$\begin{cases} F_f = Q_f + P_f \\ F_v = Q_v + P_v \end{cases} \quad (1.11)$$

Avec les hypothèses que β_Q est constant, qui doit être vérifiée sur la courbe donnant F_f en fonction de F_v , et qu'est indépendant de l'avance, il trace les courbes des deux composantes des

efforts en fonction de l'avance. Il en déduit que pour une avance supérieure à f_{mini} , les courbes sont linéaires. Donc est proportionnel à l'avance.

Dans un deuxième temps, il cherche à quantifier, pour montrer qu'une variation de n n'influe pas sur . Il fait alors varier le rayon de bec entre 0.0075 mm et 0.038 mm Il mesure F_f et F_v pour les différentes valeurs de r_ϵ et f . Comme la direction d 'est connue (donnée par la géométrie de l'outil) et que d 'après les hypothèses est constant, est entièrement connu, [15].

6.2.2.2 Modélisation analytique de la coupe en UGV

Les modèles présentés dans ce paragraphe se basent tous sur les configurations géométriques décrites dans les modèles, sous conditions de coupe conventionnelles, de Merchant, Albrecht ou Oxley (non présenté dans cette étude). Ils introduisent en plus une analyse approfondie du frottement sur les faces de coupe et de dépouille, afin d'obtenir une modélisation thermique de la zone de coupe complète. Les phénomènes thermiques et mécaniques sont pleinement couplés, [15].

6.2.3 Modèle de Gilormoni

Ce modèle est un modèle thermomécanique. Il se compose d'une analyse cinématique de l'écoulement, d'une analyse thermique du système et d'une analyse du contact entre le copeau et l'outil. Hypothèses globales portent sur la formation du copeau : le cadre est la coupe orthogonale à grande vitesse. Le copeau est supposé continu, sans arête rapportée, [15].

6.2.4 Modèle de Molinari [11]

Ce modèle récent a pour objectif de déterminer à la fois les aspects mécaniques de la coupe orthogonale (efforts de coupe et coefficient de frottement), et les aspects thermiques (température de l'interface. Comme ces aspects sont directement liés, la résolution doit être globale. Elle est simplifiée moyennant certaines hypothèses, [15].

6.2.4.1 Modélisation numérique de la coupe en UGV [12]

Le modèle proposé a pour but de modéliser la formation du copeau pour aboutir à une simulation de l'usure en cratère sur la face de coupe de l'outil. Il utilise le logiciel de simulation

par éléments finis FORGE2. La difficulté constatée pour la mise en place de cette étude est la mauvaise connaissance du comportement du métal pour de grandes déformations et de grandes vitesses de déformations, [15].

7. Conclusion

Nous avons traité dans ce chapitre, la théorie de la coupe, avec le passage en revue de quelques procédés d'usinage conventionnelles. Nous avons définis les différents paramètres de coupe ainsi que la géométrie de l'outil pour exécuter une opération d'usinage. Il en ressort qu'une complexité de celle-ci et induit des efforts de coupes ainsi que des températures qu'il faut évacuée par la lubrification abondante. La théorie de la coupe à fait pencher plusieurs chercheurs à s'occuper de ce problème pour donner des conditions adéquates de la coupe au moindre cout et un minimum de temps d'usinage et une fiabilité de changement d'outil entre deux affutages. Dans ce contexte nous avons passé en revue les différents modèles utilisés jusqu'à présent. Il en ressort que le choix d'un tel ou tel model dépend de la précision de ce que l'on veut avoir selon les conditions préétablies au démarrage.

Chapitre 2

Usure des outils de coupe

1. Introduction

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission de débris avec perte de masse, de cote, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces. L'usure comporte une part importante de réactions chimiques ; des couches superficielles chimiquement inertes peuvent parfois se révéler plus résistantes au frottement que des couches dures, surtout en présence de milieux agressifs. Elle est généralement combattue à cause de ses effets négatifs mais elle présente aussi des aspects favorables tels que l'affûtage des outils, la finition d'une surface par rectification.

2. Généralités sur l'usure des outils

Est la conséquence directe et néfaste, économiquement parlant, de conditions très sévères de frottement, et c'est vraisemblablement pourquoi aujourd'hui c'est plutôt l'étude de l'usure que celle du frottement qui est entreprise en pratique pour déterminer la fiabilité mécanique et économique d'un système tribologique particulier. Mis à part les équipements spéciaux travaillant dans l'espace ou à des températures très élevées, tous les mécanismes sont lubrifiés. Néanmoins, la plupart des études de l'usure entreprises dans les laboratoires, le dispositif expérimental le plus répandu étant du type poinçon chargé en contact avec un disque rotatif, sont réalisées avec des surfaces non lubrifiées - exceptions faites des expériences menées pour étudier les lubrifiants « extrême pression » - et cela essentiellement pour deux raisons majeures:

- les surfaces bien lubrifiées s'usent très lentement et il faudrait donc multiplier des expériences de longue durée, ce qui irait à l'encontre d'une bonne reproductibilité ;
- il est bien admis que l'usure résulte d'une rupture du film lubrifiant qui conduit temporairement à des conditions de frottement sec. Bien évidemment on peut se demander si l'hypothèse émise est vraie, malheureusement, la littérature spécialisée reste muette sur ce point. Il est supposé que le contact métal-métal crée une adhésion et que les contraintes locales sont suffisamment importantes pour produire un fragment d'usure. A travers le film lubrifiant les contacts locaux métal-métal ne sont responsables de la résistance de frottement que pour une très faible partie, la plus grande partie résultant du cisaillement du film, mais en revanche, ils constituent la principale cause d'usure. Le problème le plus important est le suivant :

D'un système de frottement à un autre, on peut observer des variations de frottement de quelques pour cent alors que les endommagements de surfaces, la perte correspondante de matériau due à l'usure peut varier d'un facteur mille ou plus. Il peut donc paraître futile de prétendre pouvoir déduire d'expériences de frottement des enseignements utiles concernant l'usure. Un autre problème consiste à comprendre le rôle que peuvent jouer les fragments d'usure sur le processus d'usure lui-même. Plus grave encore, dans quelle mesure le résultat de l'expérience de frottement conduisant à l'usure n'est-il pas conditionné par les caractéristiques mécaniques du dispositif expérimental lui-même ? Malgré ces réserves, il est bon de rappeler le modèle d'usure adhésive suggéré par Archard et Hirst [1956], lequel est toujours d'actualité [16].

3. Géométrie des outils de coupe

3.1. Généralités

La plaquette de coupe est la partie active dans une opération d'usinage. Les outils de coupe se caractérisent par leurs matériaux et par différents paramètres géométriques comme : les angles de coupe, l'acuité d'arête, le brise-copeaux, et le rayon de bec. La géométrie des outils est étudiée pour assurer une formation aisée des copeaux, offrir une arête de coupe robuste et fragmenter les copeaux en éléments d'une longueur acceptable. Un outil coupant est constitué d'un corps d'outil comportant une ou plusieurs parties actives. La partie active est constituée d'une **arête de coupe**, intersection de la **face de coupe** ($A\gamma$) et de la **face de dépouille** ($A\alpha$).

Figure 2.1 [17]

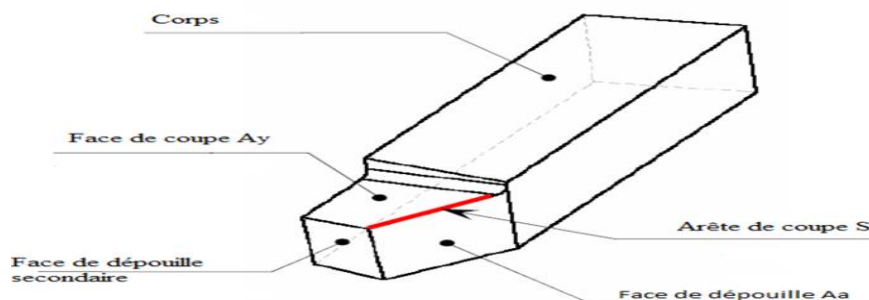


Figure 2.6 représentation de la géométrie de l'outil de coup [17]

3.2. Les faces de l'outil

$A\gamma$: face de coupe (γ : "gamma") → Face sur laquelle glisse le copeau.

A α : face de dépouille (α : "alpha") → Face devant laquelle passe la surface qui vient d'être usiné

S : arête de coupe principale → intersection entre $A\gamma$ et Aa Figure 2.2 [17]

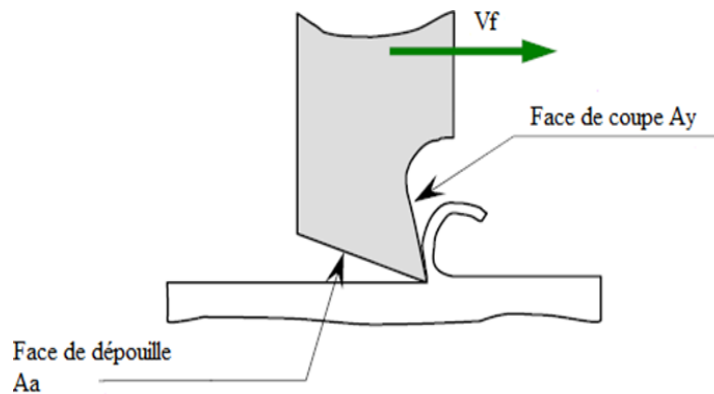


Figure 2.2 les différentes faces d'outil [17]

3.3. Angles de l'outil

Pour faciliter l'explication des phénomènes de la coupe il est nécessaire de définir les angles ayant la plus grande influence sur les dits phénomènes.

La figure 2.3 illustre, dans le système de référence outil en main, les trois angles principaux, l'angle de dépouille α , l'angle de taillant β et l'angle de coupe γ .

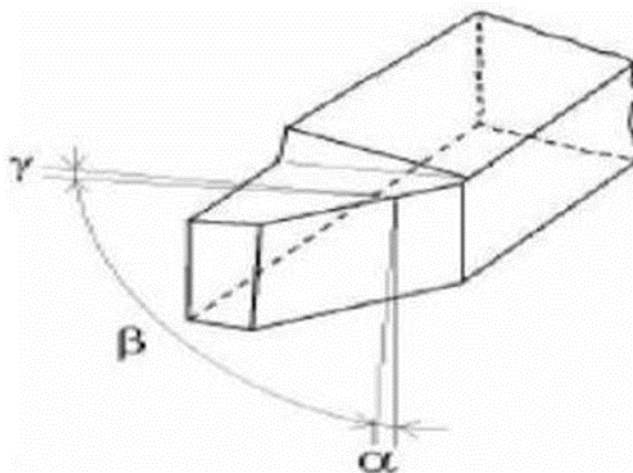


Figure 7.3 Angles du taillant (outil en main)

La figure 2.4 illustre ces mêmes angles dans les systèmes de référence outil en travail :

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



Figure 2.4 Angles du taillant (outil en travail)

Globalement, l'angle de dépouille α influe sur le frottement entre l'outil et la pièce et donc la durée utile de l'outil. L'angle de coupe γ a une influence sur la manière dont s'écoule le copeau sur la face de coupe et ainsi les efforts de coupe, la puissance consommée, les dégagements de chaleur etc. L'angle de taillant β affecte la résistance à la rupture du taillant. La somme de ces trois angles est toujours égale à 90° .

$$\alpha + \gamma + \beta = 90 \quad (2.1)$$

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

4. forme d'usure

4.1. Définition

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission de débris avec perte de masse, de cote, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces.

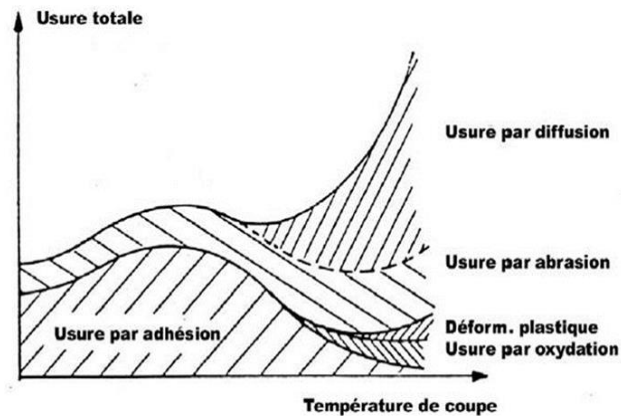
L'usure comporte une part importante de réactions chimiques ; des couches superficielles chimiquement inertes peuvent parfois se révéler plus résistantes au frottement que des couches dures, surtout en présence de milieux agressifs.

Elle est généralement combattue à cause de ses effets négatifs mais elle présente aussi des aspects favorables tels que l'affûtage des outils, la finition d'une surface par rectification [18].

4.2. Phénomènes provoquant l'usure

D'une façon générale l'usure de deux matériaux en contact est due à des phénomènes d'ordre mécanique et physico-chimique. Ces phénomènes dépendent essentiellement de la température de coupe et selon le professeur Konig l'usure se manifeste suivant le diagramme de la figure 2.5.

Figure 2.5 Diagramme d'usure en usinage.[18]



L'observation de la partie active de l'outil fait apparaître des formes d'usure caractéristiques qui correspondent aux conditions dans l'outil travaille.

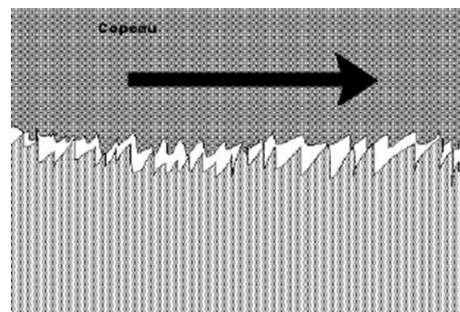
Les formes d'usure des outils de coupe dépendent essentiellement de la nature de l'outil, du matériau usiné, des conditions de coupe et du type d'usinage, de manière habituelle, pour des outils usuels, les formes suivantes sont décrites [18]

4.3. Phénomènes mécaniques

4.3.1. Usure par adhésion mécanique

Cette usure est due aux états de surface du copeau, de la pièce et de l'outil. En effet lors de l'usinage, ces entités frottent les unes contre les autres. Or les rugosités et microrugosité de ces surfaces, par contact et sous l'influence des fortes pressions engendrées par l'usinage, vont générer des microsoudures. (figure 2.6)

Figure 2.6 Processus d'usure par adhésion mécanique.[19]



Ces microsoudures se créent et se rompent très rapidement au cours de l'usinage, ce processus continu génère :

- L'apparition d'arêtes rapportées si les microsoudures sur l'outil sont plus résistantes que celles du copeau
- L'usure de l'outil si la microsoudure sur le copeau est plus résistante que celle de l'outil. Cette usure est très faible et généralement négligeable.

4.3.2. Usure par abrasion mécanique

Lors de l'usinage, la matière (pièce usinée et copeau) frotte avec des pressions de contacts importantes sur l'outil. Suivant la constitution physico-chimique (nombre, nature, composition et proportion des phases) et la structure (répartition et agencement des composants de l'alliage : forme, dimension, arrangement) la matière est plus ou moins abrasive par rapport à l'outil (figure 2.7). Si la matière comporte des constituants durs (écrouissage, aluminate, nitrure, carbure, oxyde par exemple) et que ces derniers sont plus durs que l'outil, il y aura usure par abrasion de l'outil.



Figure 2.7 Processus d'usure par abrasion.[19]

Cette usure pourra être :

- Homogène : dans le cas d'une matière où les constituants sont homogènement répartis
- Localisée : dans le cas de conditions de coupe particulières : écrouissage, apparition d'oxyde lors de l'usinage.

4.3.3. Usure par déformation plastique

Si l'on caractérise un usinage en prenant comme paramètres la température (interface outil/copeau) et la pression exercée sur l'outil, on obtient un domaine de fonctionnement. Lorsque ces paramètres prennent des valeurs très importantes, on se trouve dans le domaine de déformation plastique de l'arête de coupe. Il y a donc transformation plastique d'une partie de l'outil (arête de coupe).

4.3.4. Usure par fissuration

Lors de l'usinage, l'outil est soumis à de très importantes contraintes thermiques et mécaniques. Les contraintes thermiques à l'interface copeau / outil peuvent atteindre le millier de degré. De plus, la déformation plastique du matériau engendre, par réaction, des contraintes qui provoquent les flexions et les vibrations de l'outil. En effet, les matériaux usinés sont, par nature, rarement homogènes (phase), il y a donc variation rapide des contraintes. La combinaison des hautes températures (choc thermique en début d'usinage) et des vibrations peut provoquer des fissures au sein de l'outil.

4.4. Phénomène physico-chimiques

4.4.1 Usure par diffusion

La diffusion de matière de l'outil vers le copeau est un phénomène qui ne peut se produire qu'à des températures élevées. Ces zones de températures élevées se situent à l'endroit du frottement du copeau sur l'outil. De plus, ce sont aussi des zones de forte pression car le copeau applique des contraintes sur l'outil. Les hautes températures, ainsi que les pressions et la vitesse relative de défilement du copeau, permettent de donner suffisamment d'énergie (élévation de température) aux atomes pour que ceux-ci puissent migrer de l'outil au copeau. Ce processus est aussi grandement accentué par les phénomènes d'affinités chimiques que l'on peut avoir entre les atomes de la matière usinée et les atomes de l'outil.

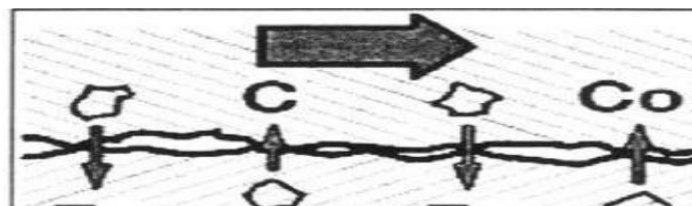


Figure 2.8 Processus d'usure par abrasion.[19]

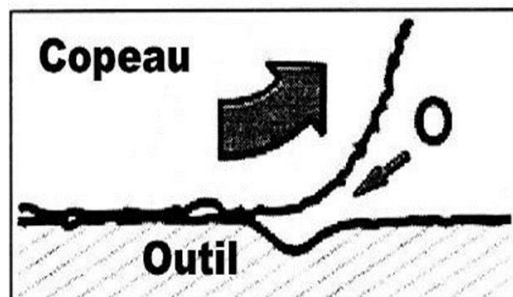
4.4.2. Usure par corrosion

Le milieu de l'usinage est constitué :

- De l'oxygène dans l'air
- Des hautes températures
- De l'eau dans les huiles de coupe solubles

Avec l'élévation de température de l'outil, la vaporisation de l'eau contenue dans les huiles solubles au contact de l'outil et l'oxygène de l'air provoquent localement une fragilisation de l'outil par oxydation de ce dernier (figure 2.9). De plus, le potentiel d'oxydoréduction des matériaux diminue avec la température ce qui favorise d'autant le processus d'oxydation des outils

Figure 2. 9 Processus d'usure par oxydation.[19]



5. Type d'usure des outils

L'ensemble des processus décrits dans les deux paragraphes précédents, en se combinant les uns aux autres, conduit à une détérioration par usure des outils. Dans ce paragraphe, nous décrivons les conséquences de ces usures. Ces dernières sont mesurables figure (2.10). sur l'usure.

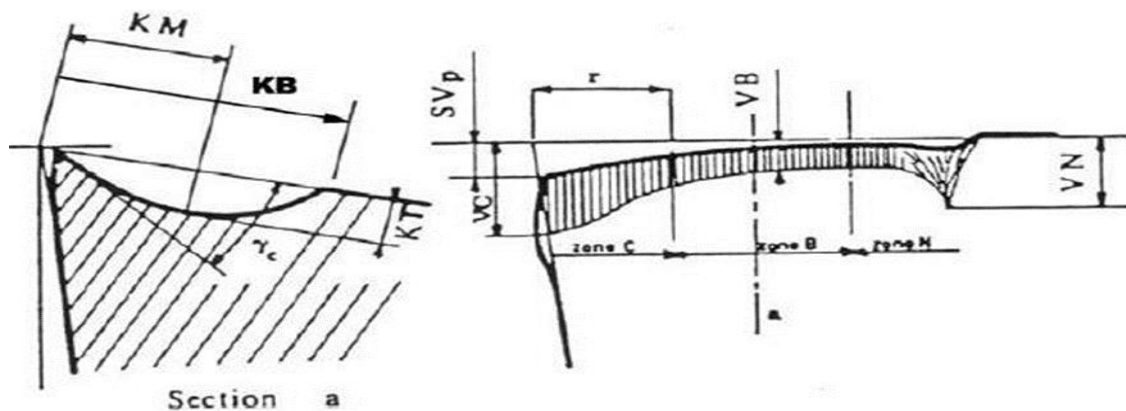


Figure 2.10 Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil.[19]

5.1. Usure en dépouille

Elle est due au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil et provoque une bande striée parallèle à l'arête de coupe. Elle influe sur l'état de surface de la pièce usinée

et sur la précision dimensionnelle de l'usinage car elle modifie la position de l'arête de coupe.

C'est un critère général pour la tenue d'outil, caractérisée par une valeur d'usure admissible VB.

Cela est dû à une vitesse de coupe excessive ou à une mauvaise position angulaire de l'outil (face decoupe / pièce).

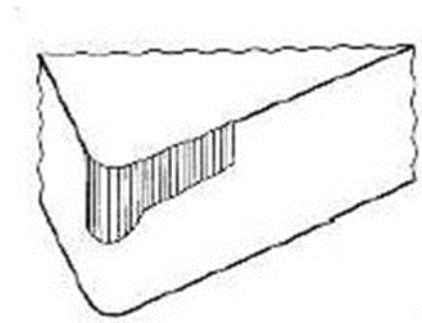


Figure 2.11 l'usure en dépouille [19]

5.2. Usure en entaille

Elle apparaît ponctuellement au niveau du point de contact entre l'arête principale de coupe et la surface de la pièce mais elle peut aussi apparaître sur la face de dépouille secondaire. Elle est due à l'écrouissage ou l'oxydation de la pièce.

Ce genre d'usure due à des phénomènes métallurgiques (calamine des pièces forgées, différence de taille de grain des pièces moulées, oxydation des aciers, austénitiques par exemple) est caractérisé par l'indice VN.

Suivant l'importance de cette usure, il y a des risques de rupture ! Cependant il est à remarquer que les entailles doivent être exclues de la mesure de VB.

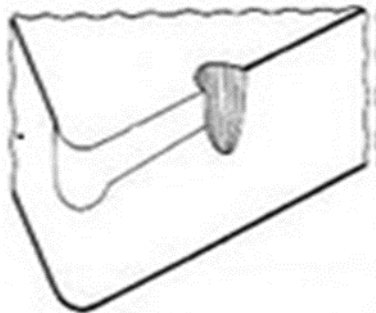


Figure 2.12 l'usure en entaille [19]

5.3. Usure en cratère

C'est une usure en creux sur la face de coupe, caractérisée par la profondeur de cratérisation (indiceKT) et le rapport K_t/K_M ou son angle de cratérisation γ_c .

Elle peut avoir à terme une incidence sur la tenue d'outil (durée de vie : effondrement ou recul de l'arête de coupe).

Elle est due au frottement du copeau sur la face de coupe de l'outil. Lors de l'usinage, la température élevée à l'interface copeau-outil et les pressions de contact entre le copeau et l'outil, provoquent une diffusion importante de la matière de l'outil vers le copeau par processus d'adhésion.

Elle donne aussi une déformation plastique de la pointe de l'outil, caractérisée par une flèche S_{vp} et un renflement de la face de dépouille.

L'usure est souvent constatée sur les outils en carbures, elle provoque généralement la rupture de la pointe de l'outil.

La valeur critique est celle à partir de laquelle l'outil est considéré comme hors d'usage avec risque important de rupture de l'outil.

L'usure est généralement due à une vitesse de coupe excessive ou à une avance trop faible.

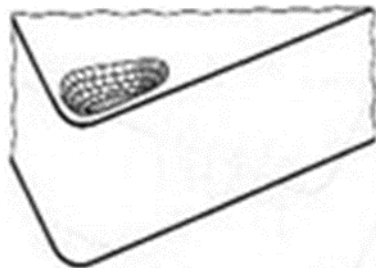


Figure 2.13 l'usure en cratère [19]

5.4. Ecaillage de l'arête de coupe

C'est une destruction de l'arête de coupe par arrachement de petits fragments d'outil, elle est généralement accompagnée d'une usure de la face de dépouille et de ce fait n'est pas toujours reconnaissable. Elle est générée par les chocs thermiques et les vibrations. Elle peut générer des ruptures. Les écaillages en dehors de la partie active de l'arête proviennent de l'impact de copeaux par suite d'une mauvaise évacuation. Cette usure est souvent le fait de chocs thermiques ou d'arête trop fragile.

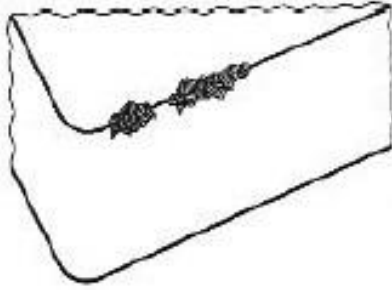


Figure 2.14 l'écaillage de l'arête [19]

5.5. Rupture de la plaquette

Une rupture de la plaquette signifie en général détérioration de l'outil et de la pièce. Ses causes sont multiples et dépendent de la machine et de la pièce. Elle est souvent le résultat d'entailles sur l'arête de coupe, d'une craterisation ou d'une usure trop importante

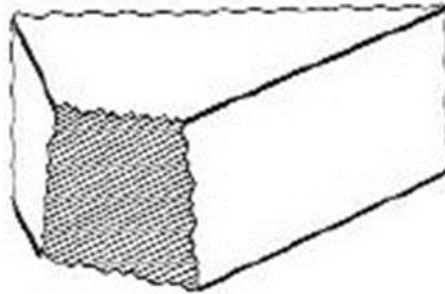


Figure 2.15 la rupture de la plaquette [19]

5.6. Arêtes rapportées

Les arêtes rapportées résultent d'une accumulation de métal de la pièce usinée sur la face de coupe, en particulier dans le cas de matériaux difficilement usinables. Il arrive parfois que cet apport de métal se détache et détériore l'arête de coupe. Il mène en outre à des états de surface médiocres.

Le phénomène est dû à une vitesse de coupe et une avance trop faible ou des angles de coupe non appropriés.



Figure 2.16 l'arête rapportée [19]

5.7. Déformation plastique

Elle est occasionnée par une sollicitation trop importante de l'arête de coupe (matériaux usinés trop durs) en combinaison avec des températures d'usinages élevées. La zone de déformation plastique du matériau dépassée, il y aura rupture !

On peut trouver cette déformation plastique en parallèle d'une cratérisation. En effet le cratère affaiblit la section de l'outil.

Critère caractéristique : VBC et SVP

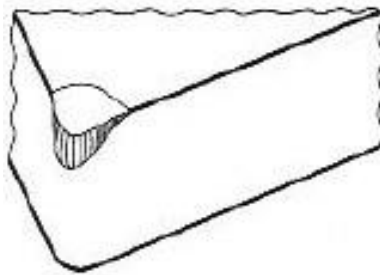


Figure 2.17 la déformation plastique [4]

5.8. Fissurations de l'arête de coupe ou usure en peigne

Légères fissures sensiblement perpendiculaires à l'arête de coupe occasionnées par les chocs thermiques résultant des interruptions de coupe, en particulier da le Risque de rupture !

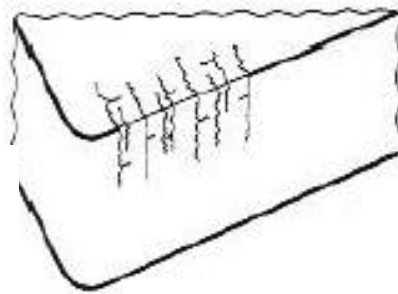


Figure 2.18 la fissuration de l'arête [19]

6. Modèles d'usure des outils de coupe

La durée d'utilisation de l'outil étant limitée par son degré d'usure, il en résulte que les temps d'usinage sont en rapport direct avec l'usure.

La définition de la durée de vie T d'un outil selon la norme ISO 3650 est donnée ainsi :

- C'est le temps de coupe total d'un outil nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique.

Il faudra donc maîtriser cette durée de vie ainsi que son évolution par rapport aux paramètres d'usinage.

6.1. Influence des paramètres de coupe sur l'usure

On peut observer deux grands groupes de paramètres dans le processus de coupe [20]. Le premier est formé par la matière usinée et les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, lubrification...) :

- Vitesse de coupe : La température de coupe étant croissante avec la vitesse de coupe, ce paramètre aura une très grande influence sur l'usure,
- Avance : Les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe, et diminuent la durée de vie de l'outil,
- Profondeur de passe : La variation de la profondeur de passe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur le long de l'arête tranchante, son influence reste modeste sur l'usure,
- Matériau usine : Son influence sur l'usure dépend de ses propriétés physiques (conductibilité thermique), de ses propriétés mécaniques (pression spécifique de coupe) et de ses propriétés chimiques (% de certains éléments d'addition),
- Lubrification : Son influence intervient faiblement sur le coefficient de frottement pièce/outil et copeau/outil, mais permet la baisse de la température de la partie active de l'outil.

Le second groupe est formé par les paramètres physique et mécanique de l'outil (géométrie et composition du matériau de l'outil, dureté, efforts et propriétés thermiques). Des chercheurs comme [21] et [22] ont observé que les différents mécanismes de l'usure interviennent pour différentes plages de vitesse. L'usure par abrasion est la plus forte à basse vitesse, mais lorsque la vitesse augmente, l'usure adhésive devient de plus en plus dominante et l'effet d'abrasion diminue ou disparaît. La température est une fonction de la vitesse, l'excès de chaleur catalyse le phénomène d'usure. Diminuer la chaleur dans le système d'usinage est une méthode naturelle pour contrôler la vitesse et le niveau d'usure. Comme les propriétés thermiques sont supposées constantes, la seule manière de changer les conditions thermiques est d'agir par des moyens extérieurs au système.

6.2. Modèle de Taylor

Taylor fut le premier à proposer en 1907, un modèle mathématique reliant la durée effective de coupe T d'un outil aux paramètres de coupe [23].

L'usure est sensiblement linéaire dans le temps, figure 2.19.a, pour un outil rodé. On peut éviter l'usure accélérée du début, de même que la partie non linéaire survient qu'après la limite d'usure de cet outil. On peut donc déterminer les temps T_i pour lesquels on atteint la limite de durée de vie pour une vitesse V_i .

En prenant le même critère et en veillant à ce que toutes les autres conditions cinématiques de coupe restent constantes, notamment l'avance f et la profondeur de passe a_p , il est possible de déterminer la relation liant la durée de vie d'un outil à la vitesse de coupe, figure 2.19.b.

Cette courbe est difficilement exploitable, aussi est-il intéressant de la tracer dans un repère dont les échelles sont logarithmiques, figure 2.19.c.

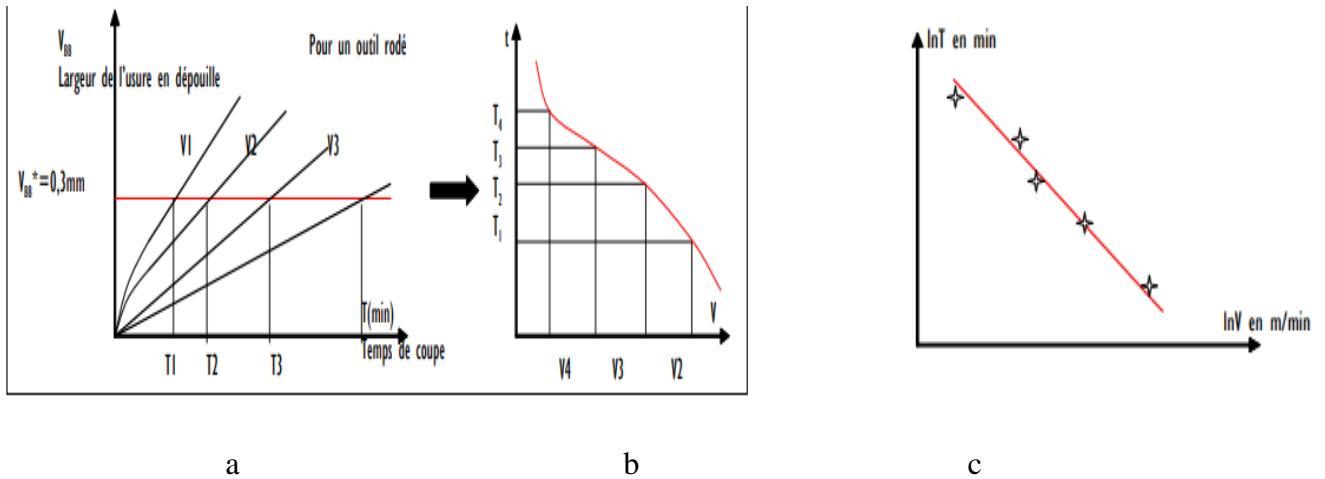


Figure 2.19 Modèle de Taylor [23]

Elle devient pratiquement une droite, dans la zone d'utilisation courante des outils :

$$\ln T = a \cdot \ln V + B \quad (2.2)$$

Soit :

$$T = A \cdot V^a \quad (2.3)$$

Elle est connue sous le nom de droite de Taylor.

La norme lui donne le nom de courbe V-T. Son équation est écrite sous la forme :

$$VT^{(-\frac{1}{k})} = c \quad (2.4)$$

C'est une constante, qui correspond à la vitesse de coupe qui donnerait une durée de vie de 1 mn. Pour les aciers usinés au CM, C vaut de 200 à 800 m/mn

V est la vitesse de coupe en m/min,

T est la durée de vie de l'outil à la vitesse V et s'exprime en min,

K est la pente de la droite et, dépend du matériau de la pièce et de l'outil

Quelques valeurs connues de K pour l'usinage des aciers sont présentes dans le tableau 2.1.

K	Matériau a outil
-5 a -8	ARS
-2.5 a -6	CARBURE
-1.5 a -2.5	CERAMIQUE

Tab 2.1 Valeurs du coefficient K

L'influence des autres paramètres de coupe (f et a_p) sont montrés sur la figure 2.20

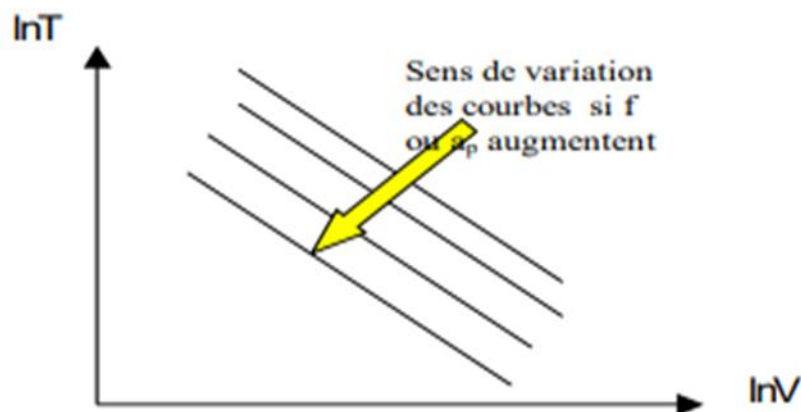


Figure 2.20 sens de variation des courbes si f , a_p augmente [23]

Taylor ne tient pas compte de l'avance ou de la profondeur de passe ce qui diminue sensiblement le nombre d'essai. Le CETIM (centre technique des industries mécaniques) [23] reprend sa méthode en précisant le type d'usinage ou d'opération, à savoir ébauche ou finition.

On remarquera la précision apportée à la définition de l'outil utilisé.

L'ENSAM (école nationale d'art et métier) [23] reprend cette formule sous la forme :

$$T = C V^n \quad (2.5)$$

Où n devient l'exposant de TAYLOR

C : Constante dépendant du couple outil/pièce

6.3. Modèle de Gilbert (modèle de TAYLOR généralisé)

Ce modèle, qui date de 1950, est en fait une généralisation de la loi de Taylor proposé par Gilbert pour prendre en considération l'influence de l'avance (f) et de la profondeur de passe (a_p). Plusieurs recherches ont été réalisées pour trouver les constantes de ce modèle. Il est caractérisé par l'équation suivante :

$$T = K * a_p^x * f^y * V^n \quad (2.6)$$

K : dépend de la nuance de l'outil et de matériau usiné,

a_p : profondeur de passe

f : avance,

x, y : exposants dépendant de la nuance de l'outil

6.4. Lois d'usure d'outil mesurées par des essais d'usinabilité

Les lois d'usure d'un couple outil-matériau usiné sont des photographies des effets cumulés de tous les endommagements actifs au cours d'une opération d'usinage bien définie. Elles sont déterminées au moyen d'essais qui peuvent se faire en atelier ou en laboratoire

On a vu que plusieurs paramètres (usure frontale VB, cratérisation KT, etc...) permettent de suivre globalement l'évolution de la géométrie de l'outil. On peut utiliser des valeurs maximales admissible de ceux-ci (ou d'autres indicateurs en relation avec la qualité de la surface usinée, par exemple) pour définir de façon conventionnelle la durée de vie T d'un outil pour une condition de coupe donnée (c'est-à-dire une valeur(V), de (f), un diamètre (d) d'outil ou une profondeur de passe (a), etc...) et une technologie d'usinage. Pour les usinages discontinus, T est le cumul des temps de coupe effectifs et non le temps d'essai. Aussi peut-on substituer à la notion de temps celle de longueur usinée L . Pour un type de machine-outil, la loi d'usure d'un couple outil-matière usinée est de la forme :

$$T = T(V, f, d) \quad \text{Où} \quad T = T(V, f, a) \quad \text{Où} \quad L = (V, f, d) \quad (2.7)$$

Assez souvent la loi d'usure est du type loi généralisée Taylor :

$$V = K * T^n * f^p * a^q \quad (2.8)$$

Avec K coefficient dépendant de la valeur limite du critère géométrique d'usure d'outil. En tournage, on peut montrer que :

$$K = K_0 * VB^m \quad (2.9)$$

Cinq paramètres sont donc nécessaires pour décrire le système outil/matière usinée/machine-outil. Toutefois q est généralement très petit, m varie peu d'un matériau usiné à un autre (pour une famille de matériaux). Le plan d'expériences permettant de déterminer les seuls trois paramètres q , n et p reste de taille raisonnable

Valeurs indicatives des coefficients n , p et q de la loi généralisée de Taylor dans le cas du tournage d'aciers avec des plaquettes de coupe				
Grade de L'outil	Acier	N	P	Q
P30	XC 10	-0.25	-0.25	-0.12
P15		-0.36	-0.22	-0.12
AL ₂ O ₃		-0.60	-0.50	-0.10
P30	XC 38	-0.20	-0.35	-0.12
P15		-0.28	-0.37	-0.12
AL ₂ O ₃		-0.51	-0.50	-0.10
P30	18CD4	-0.21	-0.33	-0.12
P15		-0.31	-0.30	-0.12
AL ₂ O ₃		-0.57	-0.50	-0.10
P30	42CD4 (230HB)	-0.18	-0.40	-0.12
P15		-0.26	-0.40	-0.12
AL ₂ O ₃		-0.48	-0.40	-0.10
P30	42CD4 (290HB)	-0.15	-0.45	-0.12
P15		-0.20	-0.50	-0.12
AL ₂ O ₃		-0.38	-0.50	-0.10

Tab 2.2 valeurs indicatives du coefficient de loi généralisé de Taylor [23]

Quand on compare entre des matériaux dans des conditions d'essai bien définies, en général on ne fait pas varier l'avance f_0 ni la profondeur de passe a_0 ; on choisit une valeur limite du critère d'usure de l'outil (par exemple VB_0) et le temps T_0 au bout duquel l'outil aura subi cette usure. Chaque matériau est alors caractérisé par la vitesse V_0 correspondante. Des essais conformes à la norme ISO 3685 sont le plus souvent réalisés dans des conditions telles que : $T_0 = 20$ min, $aP_0 = 2$ mm, $f_0 = 0.4$ mm /tr et $VB_0 = 0.3$ mm

Choix des conditions de coupe en tournage (ISO 3685)				
Rayon du bec de l'outil	0.4	0.8	0.8	1.2
Avance f_0(mm/tr)	0.32	0.64	0.64	0.95
Profondeur de passe a_0 (mm)	>0.8 10 f_0	>1.6 10 f_0	>1.6 10 f_0	>2.4 10 f_0

Tab 2.3 choix des conditions de coupe [23]

On utilise fréquemment des notations indicées de types V_{c20} , $VB_{0,4}$ pour préciser dans quelles conditions la vitesse de référence V_0 est mesurée.

Si l'on considère à nouveau le cas des quatre nuances d'aciers 42CrMo4 ayant même dureté, on constate que les vitesses V_0 mesurées en usinant ces nuances avec des outils en carbure de tungstène de grade P40 sont très différentes :

Acier	% S = 0.03 Oxydes Al_2O_3	% S = 0.03 Oxydes aluminates
$V_0 = V_{c20}, VB_{0,4}$ (m /min)	105	145
Acier	% S = 0.08 Oxydes Al_2O_3	% S = 0.08 Oxydes aluminates
$V_0 = V_{c20}, VB_{0,4}$ (m /min)	140	195

Tab 2.4 valeur de vitesse [23]

6.5. Modèle de COLDING

Ce modèle (1958-1960) tient compte d'une courbure négative. Ce sont des polynômes de la forme.

$$K + a.X + C.Y - Z + K.X.Z = 0 \quad (2.10)$$

$$\text{Ou } K + aX + bX^2 + cY + dY^2 + cZ^2 - Z + f.X.Y + g.Y.Z + h.X.Z = 0 \quad (2.11)$$

$$\text{Avec } X = \log F, Y = \log V \text{ et } Z = \log T. \quad (2.12)$$

La complexité de ce modèle et la difficulté d'obtenir toutes les constantes (a, b, c, d, e, f, g, h) pour chaque cas, le rendent très peu exploitable. Pourtant Il tient compte des diverses particularités du phénomène de coupe, notamment de l'existence de valeur optimale de l'avance que les modèles plus simples ne laissent apparaître.

6.6. Modèle de KONING-DEPIEREUX (1969)

$$T = \exp. (-\alpha.V_c^n - \gamma.ap^\mu - \sigma.f^\lambda) \quad (2.13)$$

Ce modèle conduit à une représentation correcte de la loi d'usure et son type exponentiel est en accord avec les courbes expérimentales qui déterminent l'usure des outils. Compte tenu des dispersions liées aux essais d'usure, le modèle simple de TAYLOR est suffisamment représentatif, c'est pourquoi il est couramment utilisé.

6.7. Bilan des modèles d'usure

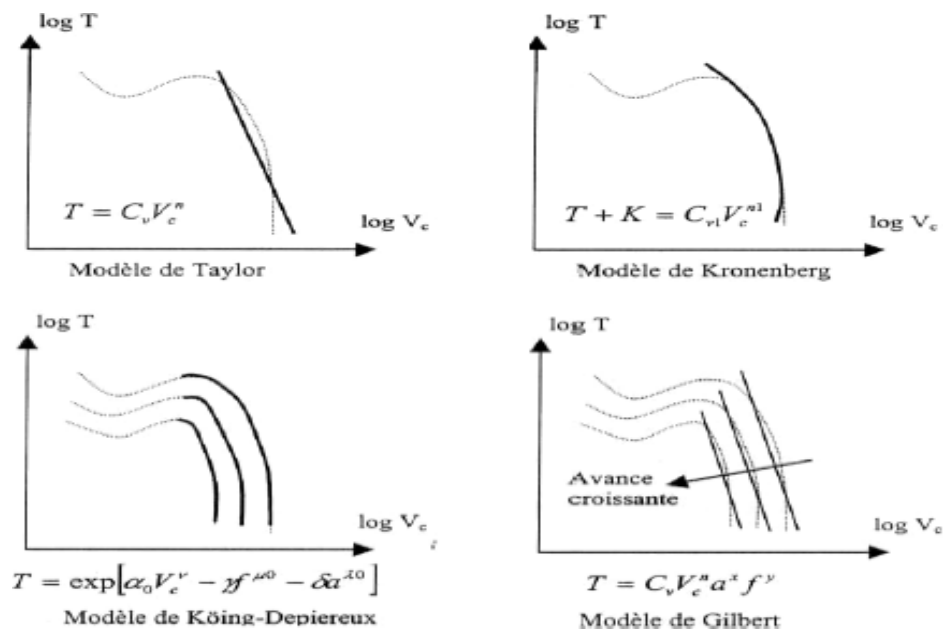


Figure 2.21 Représentation graphique des différents modèles.

Le choix de tel ou tel modèle sera le résultat d'un compromis entre, d'une part le souci de précision qui exige du modèle une représentation suffisamment exacte de l'essai expérimentale, et d'autre part, la nécessité pratique de conserver une formulation assez simple permettant une exploitation aisée de ces données sous des formes très diverses (abaque, graphique, etc....).

Compte tenu des dispersions liées aux essais d'usure, le modèle simple de Taylor est suffisamment représentatif, il est couramment utilisé aujourd'hui pour tous les matériaux d'outils.

7. Techniques de la mesure de l'usure

7.1. Critères d'usure d'outil utilisés pour arrêter un essai (ISO 3685)

Il convient de se rapporter à la norme qui définit les divers critères d'usure qui peuvent être choisis, leurs valeurs maximales prises en compte pour arrêter un essai et surtout les précautions à prendre pour faire les mesures.

Les valeurs ci-dessous situent les valeurs maximales des critères le plus souvent pris en compte.

- Outil en acier rapide : **$VB_0 = 0.3 \text{ mm}$**

Pas de critère de cratérisation

- Outil en carbure : **$VB_0 = 0.3 \text{ mm}$ et $KT_0 = 0.06 + 0.3 f_0$ (en mm)**
- Outil en céramique : **$VB_0 = 0.3 \text{ mm}$**

Pas de critère de cratérisation

7.2. Critères d'usure

Les critères usuellement utilisés pour des outils en carbures et, notamment ceux recommandés par la norme en vigueur concernant l'usure des outils de coupe la norme, **NF E 66 505**, se rangent en deux catégories décrites ci-dessous.

a) Critères directs

Ils sont basés sur l'évolution de l'usure tel que :

- Critère d'usure frontale, caractérisé par une largeur limite **VB limites** de la bande d'usure sur la face en dépouille de l'outil.
- Critère de cratérisation, défini par la valeur limite de la profondeur du cratère **KT limites** ou par la valeur limite du rapport de cratérisation **KT/KM** ou par une valeur limite de l'angle de cratérisation γ_c .
- Critère de « **mort d'outil** », utilisé principalement pour les outils en acier rapide.
- Critère d'usure volumétrique ou massique caractérisé par la perte en poids de l'outil, mesurée par pesée ou à l'aide de traceurs radioactifs.
- Critère basé sur les variations de cotes des surfaces usinées, actuellement utilisé pour la détermination de l'usinabilité des aciers.

b) critères indirects

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

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

7.3. Point de vue pratique

D'un point de vue pratique, l'usure frontale est la plus importante à considérer puisqu'elle détermine l'état de surface de la pièce usinée et la précision dimensionnelle. Dans le cas des outils en acier rapide, les mesures de l'usure frontale présentent une dispersion importante due principalement à l'hétérogénéité des aciers à outils et de la matière usinée et la présence d'une zone morte au voisinage du bec, qui se traduit par l'apparition d'une arête qui protège la face en dépouille dans certains cas.

Par contre, l'expérience montre que l'évolution de l'usure des outils à Plaquette en carbure métallique permettant des vitesses de coupe plus élevées, peut être définie de façon satisfaisante par la seule mesure de l'usure frontale, dans une large plage de paramètres de coupe.

Pour des paramètres de coupes élevées (provoquant une élévation de la température entre l'outil et le copeau) l'usure par diffusion s'accélère ce qui favorise une évolution rapide de la cratérisation. La durée de vie d'un outil en carbure ou en céramique correspond à la durée au bout de laquelle on atteint une usure maximale admissible selon le mode d'usinage. Les critères directs les plus utilisés sont ceux de l'usure en dépouille limite **VBmax** et l'usure en cratère limite **KTmax**.

On peut aussi rencontrer des critères indirects qui seront considérés dans cette étude et qui sont basés sur la variation de certaines grandeurs physiques de la coupe en fonction de l'usure de l'outil. Nous retiendrons la rugosité comme critère indirect de la surface usinée pour notre étude sur le tournage d'un acier dur avec des plaquettes **CBN**. Pour des usinages courants en mécanique générale ou en outillage, les limites acceptables pour l'usure en dépouille et l'usure

en cratère selon la norme **NF E 66 505** sont les suivants :

- Une largeur moyenne de la bande d'usure frontale de **0.3 mm** si elle est uniforme, ou une largeur maximale **VB_{max} = 0,5 mm**,
- Une profondeur maximale du cratère égale à : **KT = (0,1+0,3f) mm**

a) Critère usuel d'outil de coup

Le mode d'usure qui semble contribuer à la fin de la durée de vie utile de l'outil devra servir de guide pour le choix du critère. Le type et la valeur du critère utilisés devront être notés au procès-verbal

Remarque : Si le mode d'usure prédominant n'est pas évident, il est possible d'utiliser soit deux courbes **V-t**, soit un critère mixte donnant une courbe **K-T** brisée (cas typique d'une avance de 0.4 mm/t, la vie de l'outil devra être considérée terminée lorsque **VBB=0.33mm** ou **KT=0.18mm** est atteint)

b) Critères usuels pour les outils en acier rapide

Les critères les plus utilisés pour les outils en acier rapide sont les suivants

- 1) Défaillance brutale,
- 2) Largeur moyenne de l'usure en dépouille **VBB = 0.3mm** si l'usure en dépouille est considérée régulière dans la zone B,
- 3) Largeur maximale de l'usure en dépouille **VB_{max} = 0.6mm** si l'usure en dépouille est irrégulière, rayée, écaillée ou fortement striée dans la zone

c) Critères usuels pour les outils en carbures métalliques frites

Les critères généralement utilisés pour les outils en carbures métalliques frites sont les suivants :

- 1) Largeur moyenne de l'usure en dépouille **VBB = 0.3mm** si l'usure en dépouille est considérée comme régulière dans la zone B
- 2) Largeur maximale de l'usure en dépouille **VB_{max} = 0.6mm** si l'usure en dépouille est irrégulière dans la zone B
- 3) Profondeur du cratère **KT**, en millimètres, donnée par la formule :

$$KT = 0.06 + 0.3 f \quad (2.14)$$

Ou f est l'avance en millimètres par tour

Pour les avances « standard », ceci aboutit aux valeurs suivantes de KT représentée sur le tableau lorsque KT est pris comme critère :

Avance f en mm/tr	0.2	0.4	0.63
Profondeur KT en mm	0.14	0.18	0.25

Tab 2.5 valeurs KT en fonction de f

d) Critères usuels pour les outils en céramique

Les critères les plus généralement utilisés pour les outils en céramique sont les suivants :

- 1) Largeur moyenne de l'usure en dépouille **VBB = 0.3 mm** si l'usure en dépouille est considérée régulière dans la zone B
- 2) Largeur maximale de l'usure en dépouille **VBB_{max} = 0.6 mm** si l'usure en dépouille est irrégulière dans la zone B
- 3) Défaillance brutale

e) Critères usuel pour tournage de finition

La rugosité de surface est un critère usuel pour le tournage de finition et les valeurs suivantes de **Ra** (Voir NF E 05-016) sont recommandées

0,4 - 0,8 - 1,6 - 3,2 - 6,3 - 12,5

On retiendra sur le tableau :

Outil	Critère en ébauche	En finition
ARS	Défaillance brutale VBB _{moyen} = 0.3mm VBB _{max} = 0.6mm	Rugosité > Ra = 3.2
CARBURE	VBB _{moyen} = 0.3mm VBB _{max} = 0.6mm KT = 0.06 + 0.3 f	Rugosité
CERAMIQUE	Défaillance brutale VBB _{moyen} = 0.3mm VBB _{max} = 0.6mm	Rugosité

Tab 2.6 critère usuel et la rugosité

8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons synthétisé le comportement des outils de coupes à l'usure, en effet la complexité de la coupe met en évidence des phénomènes physico chimiques complexes et parmi ces phénomènes nous retrouvons l'usure des outils qui altèrent d'une manière directe la surface et la qualité de la pièce à usiner d'où la nécessité de se pencher sur ce phénomène très préoccupant au niveau des entreprises et des laboratoires de recherches. Dans ce contexte nous avons passé en revue les différents types d'usures et les différents modèles ayant traité ce sujet. Il en ressort que toutes les études jusqu'à présent sont expérimentales et qu'il existe différents modèles. Par contre le choix d'un tel ou tel modèle se fait par les conditions préalables de ce que l'on veut chercher, il reste que le modèle de Taylor reste le plus simple à cause des simplifications qu'il offre pour son établissement, mais l'évolution de nouveaux matériaux de coupe et les matières à usiner de plus en plus dur mais en évidence d'autres approches qui sont à l'étude.

Chapitre 3

Modélisation et optimisation expérimentale de l'usure

1. Introduction

Nous traitons dans ce chapitre une approche de modélisation et d'optimisation de l'usure par variation des conditions de coupes en tournage d'une opération de chariotage. Les résultats expérimentaux effectués dans le cadre de travaux de recherche à l'ENPO pour un mémoire de magistère [24] sont la base de cette étude. La méthode choisie est celle de l'analyse dimensionnelle des essais expérimentaux [25].

En effet selon cette dernière chaque phénomène physique peut être décrit par son analyse dimensionnelle. Donc à partir des différents paramètres mis en évidence nous avons déterminés la fonction et le model mis en jeu, en fonction des graphes et par la suite tracer les graphes de la fonction cibles pour déterminer les valeurs de l'usure maximal et les différentes conditions de l'usinage à la moindre usure ou économique.

2. Méthodologie d'analyse

En général la recherche d'une fonction expérimentale représentant, l'expérience et les conditions limites étudié repose sur une analyse et le traitement grapho-analytique des résultats d'essais. Celle-ci repose sur une méthode dite de la fonction empirique qui s'écrit sous la forme de l'équation

$$\mathbf{y = a \cdot x^b} \quad (3.1)$$

Qui décrit avec une justesse suffisante les relations mises en évidences lors d'une étude expérimentale. Elle permet de traiter simplement les résultats obtenus lors des essais. En coordonnées logarithmiques, la courbe représentative est une droite et s'écrit :

$$\mathbf{\text{Log } y = \text{log } b . \text{log } x} \quad (3.2)$$

L'obtention d'une relation concrète mène à retrouver les valeurs numériques du coefficient (a) et de l'exposant (b). Pour cela, on exécute une série d'essais où on ne fait varier que la variable (x), les autres paramètres étant constants.

Le traitement peut être réalisé par deux procédés :

- Grapho-analytique ;

- Analytique.

Dans le premier cas, il faut tracer les fonctions $y = F(x)$ en coordonnées logarithmiques comme indiqué par la figure 3.1.

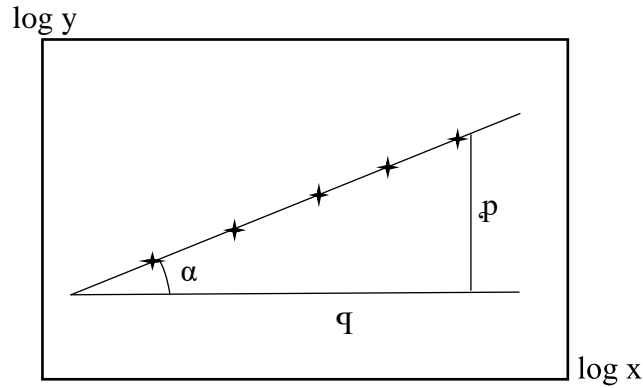


Figure 3.1 représentation d'une fonction empirique

Le procédé demande une observation rigoureuse des échelles. L'échelle entre x et y est exprimée par la relation (3.2)

$$E_y = E \cdot 10^k \quad (3.2)$$

Où, k est un nombre entier quelconque, positif, négative. Autrement dit, le facteur d'échelle sur l'abscisse et sur l'ordonnée doit être le même. On trace la droite reliant les points extrêmes avec le moins de déviation possible entre eux et cette droite. La tangente de l'angle α (figure.3.1) est l'exposant recherché :

$$b = \frac{p}{q} \quad (3.3)$$

Pratiquement, on trace un triangle rectangle, et en mesurant à l'aide d'une règle les deux côtés, on trouve leur rapport. Le coefficient (a) est déterminé par l'équation :

$$\log a = \frac{\sum_{i=1}^n \log y_i}{n} - b \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \log x_i}{n} \quad (3.4)$$

Où n est le nombre d'essais.

Pour trois variables, la fonction type s'écrit

$$Y = a \cdot x^{b1} \cdot z^{b2} \cdot w^{b3} \quad (3.5)$$

La procédure de la détermination des différents paramètres consiste, à préparer autant de série d'essais qu'il y a d'inconnues dans la relation (3.5). Pour chaque série, on fait varier un seul paramètre, les autres étant constants. Puis, pour chaque série, on détermine l'exposant, et à l'aide de l'équation (3.4), on détermine la valeur du coefficient (a). Donc dans le cas de trois variables x, z, w on obtiendra :

$$\begin{aligned} y &= a1 \cdot x \\ y &= a2 \cdot z \\ y &= a3 \cdot w \end{aligned} \quad (3.6)$$

Le coefficient (a) pour l'équation générale est calculé selon les résultats des trois séries d'essais :

$$a_I = \frac{a_1}{z_c^{b2} \cdot w_c^{b3}} ; a_{II} = \frac{a_2}{x_c^{b1} \cdot w_c^{b3}} ; a_{III} = \frac{a_3}{z_c^{b1} \cdot z_c^{b2}} \quad (3.7)$$

Où x, z, w, sont les valeurs des variables correspondant aux séries d'essais ou elles étaient constantes.

Les valeurs a_I , a_{II} , a_{III} , peuvent être différentes à cause des erreurs mises lors des essais, c'est pourquoi, à partir de ces valeurs, on calcule la moyenne (a) qui s'écrit :

$$a = \frac{a_I + a_{II} + a_{III}}{3} \quad (3.8)$$

3. Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux d'une série de douze essais d'une opération de chariotage sur une pièce à usiner en 42CrMo4 et un outil en carbure métallique P30. L'objectif est le suivi du comportement à l'usure de l'arête de coupe en faisant varier les paramètres de coupe à savoir la vitesse de coupe (V_c), la profondeur de passe (a_p) et l'avance (f) lors d'un temps d'usinage de deux minutes ($T=2mn$). Le tableau 3.1, illustre les différents essais et la mesure de l'usure VB et le calcul du débit volumique de l'opération et la figure 3.2 illustre l'évolution de l'usure lors de la campagne des douze essais. Il est à remarquer que le calcul du débit se fait de la manière suivante

On sait que l'équation de la masse s'écrit :

$M = \rho.V \Rightarrow V = \frac{M}{\rho}$, où V représente le volume ou le débit volumique et ρ la masse volumique

de la pièce à usiner.

Paramètres d'entrés				Paramètres de sorties		
expérienc e	Paramètres de coupes			VB (usure) mm	Masse Kg	Débit volumique dm ³
	Vc(m/min)	ap(mm)	f(mm/tr)			
Exp1	100	2	0.2	0.05	0.750	0.095
Exp2	150	4	0.2	0.2	2.050	0.261
Exp3	200	2	0.3	1.9	1.260	0.161
Exp4	100	4	0.3	0.30	1.545	0.197
Exp5	150	2	0.2	0.13	1.300	0.166
Exp6	200	4	0.2	2.1	0.710	0.090
Exp7	100	2	0.3	0.3	0.810	0.111
Exp8	150	4	0.3	1.5	0.610	0.077
Exp9	200	2	0.2	0.3	1.280	0.163
Exp10	100	4	0.2	0.06	1.360	0.173
Exp11	150	2	0.3	0.35	1.425	0.182
Exp12	200	4	0.3	Cassée 5	////////	////////

Tab 3.1 Paramètres expérimentales et valeurs de l'usure

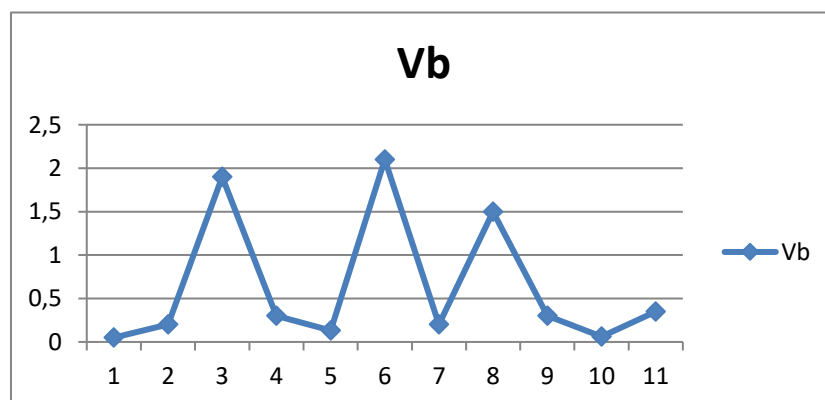


Figure 3.2 représentation graphique de l'évolution de l'usure

4. Extraction de la fonction expérimentale

On se basant sur l'équation 3.5, la fonction expérimentale s'écrit

$$Y = a X^m Z^n W^q \quad (3.9a)$$

Ecrivons :

$$Y = Vb; a = k; X = Vc; Z = ap; W = f$$

Donc la fonction devient :

$$Vb = K Vc^m ap^n f^q \quad (3.9b)$$

4.1. Détermination des paramètres m , n et q

La procédure consiste à tracer les courbes de de l'usure (VB) en fonction de la vitesse de coupe (Vc), de la profondeur de passe (ap) et de l'avance (f) comme indiqué par les figures 3.3,3.4 et 3.5, par la suite nous traçons les courbes de tendances et nous déduisons leurs équations comme indiqué par le tableau 3.2 qui vont nous permettre de déterminer les paramètres moyens pour chaque variables étudié.

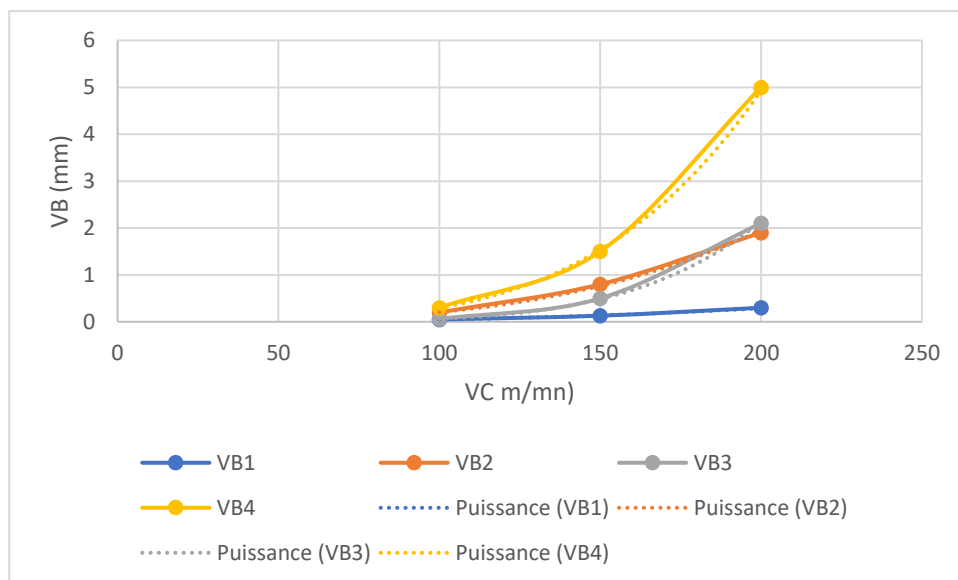


Figure 3.3 Variation de l'usure en fonction de VC

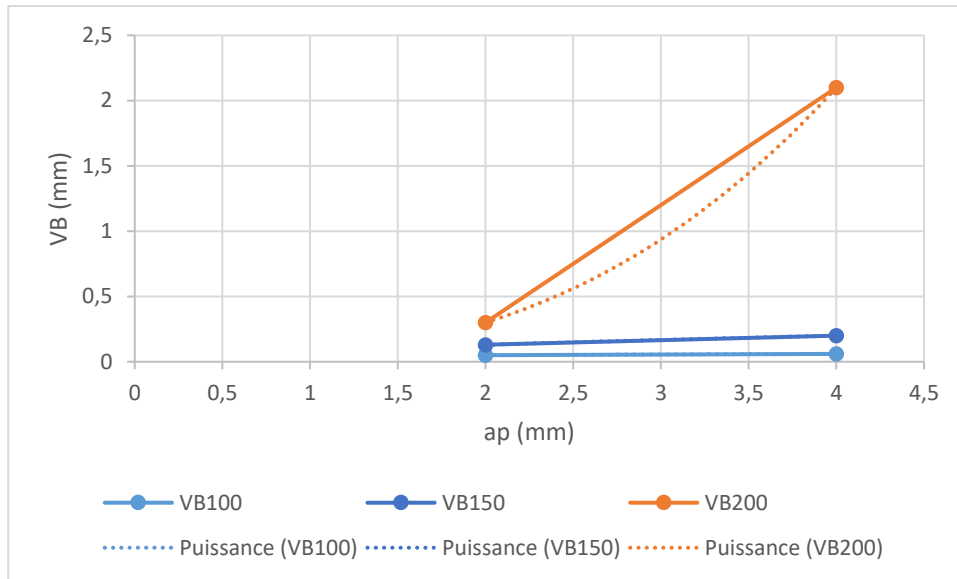


Figure 3.4a Variation de l'usure en fonction de a_p pour $f=0.2\text{mm/tr}$

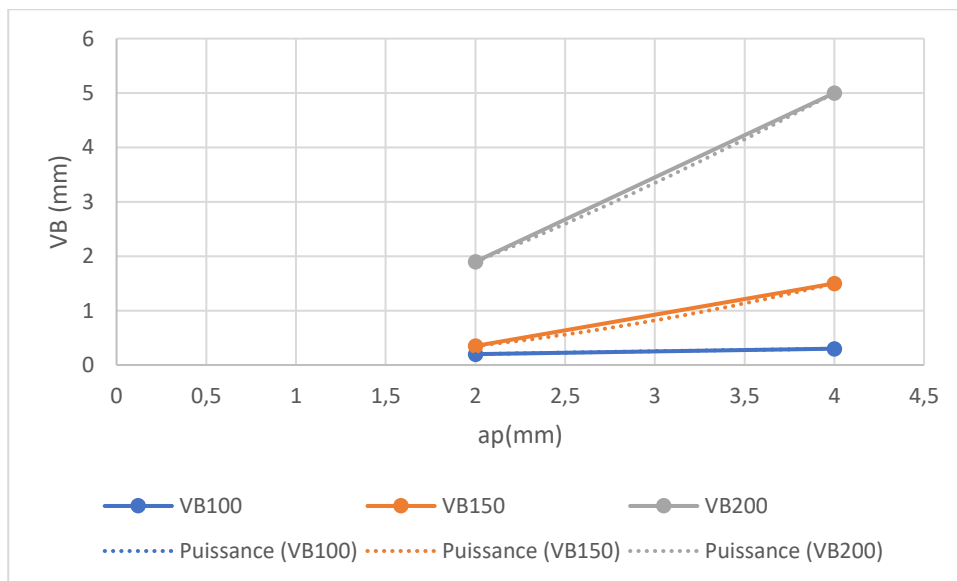


Figure 3.4b Variation de l'usure pour en fonction de a_p , pour $f=0.3\text{mm/tr}$

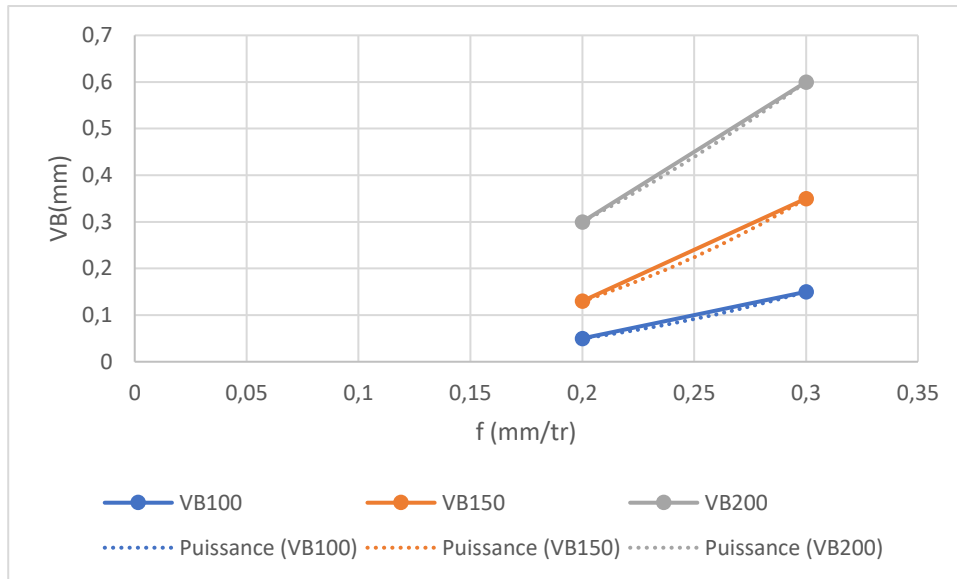


Figure 3.5a Variation de l'usure en fonction de l'avance pour $a_p = 2\text{mm}$

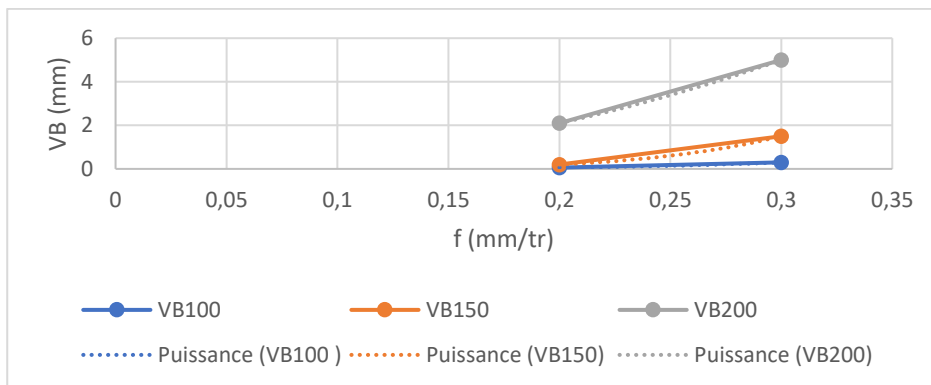


Figure 3.5b Variation de l'usure en fonction de l'avance pour $a_p = 4\text{mm}$

VB= f (VC)	VB= f (ap)	Vb = f= (f)
- VB1 = $4E-07Vc^{2,57}$	f=0.2mm/tr	ap=2mm
- VB2 = $3E-12Vc^{5,1358}$	- VB5 = $0,0417ap^{0,263}$	- VB11 = $3,9159f^{2,7095}$
- VB3 = $6E-08Vc^{3,2592}$	- VB6 = $0,0845ap^{0,6215}$	- VB12 = $6,6262f^{2,4426}$
- VB4 = $2E-09Vc^{4,053}$	- VB7 = $0,0429ap^{2,8074}$	- VB13 = $4,6991f^{1,7095}$
	f=0.3mm/tr	ap=4mm
	- VB8 = $0,1333ap^{0,585}$	- VB14 = $35,696f^{3,9694}$
	- VB9 = $0,0817ap^{2,0995}$	- VB15 = $594,93f^{4,9694}$
	- VB10 = $0,722ap^{1,3959}$	- VB16 = $65,717f^{2,1395}$

Tab 3.2 Equation des courbes des tendances des différents essais

Pour $V_b = f(V_c)$

$$b_1 = \frac{2.57+3.2592+5.1358+4.053}{12} = 1.25$$

$$m = b_1 = 1.25$$

Pour $V_b = f(a_p)$

$$b_2 = \frac{2.8074 + 0.6215 + 0.263 + 1.3959 + 2.0995 + 0.585}{6} = 1,295$$

$$n = b_2 = 1,3$$

Pour $V_b = f(f)$

$$b_3 = \frac{1.71 + 2.443 + 2.709 + 2.139 + 4.969 + 3.969}{6} = 2.990$$

$$q = b_3 = 3$$

4.2. Détermination du paramètre K et de l'équation expérimentale

Pour $V_b = f(V_c)$

$$a_1 = \frac{4E-07 + 6E-08 + 3E-12 + 2E-09}{4} = 1.155E - 07$$

$$a_1 = 1.155E - 07$$

Pour $V_b = f(a_p)$

$$a_2 = \frac{0.0429+0.0845+0.0417+0.722+0.0817+0.1333}{6} = 0.184$$

$$a_2 = 0.184$$

Pour $V_b = f(f)$

$$a_2 = \frac{4.6991+6.6262+3.9159+65.717+594.93+35.696}{6} = 118.60$$

$$a_3 = 118.6$$

Détermination de “ a_i , a_{ii} , a_{iii} ” :

➤ **Détermination de a_i :** pour

$$a_{i1} = \frac{a_1}{ap^{b_2} \cdot fb_3}$$

$$\begin{cases} ap = 2,4 \\ f = 0.2, 0.3 \\ a_1 = 1.155E - 7 \\ b_2 = 1.295 \\ b_3 = 2.99 \end{cases}$$

$$a_{11} = \frac{1.155E - 07}{2^{1,295} \cdot 0.2^{2.99}}$$

$$= 5.874E - 6$$

$$\begin{cases} ap = 2 \\ f = 0.2 \end{cases}$$

$$a_{12} = \frac{1.155E - 07}{2^{1,295} \cdot 0.3^{2.99}}$$

$$= 1.741E - 6$$

$$\begin{cases} ap = 2 \\ f = 0.3 \end{cases}$$

$$a_{13} = \frac{1.155E - 07}{2^{1,295} \cdot 0.2^{2.99}}$$

$$= 2.394E - 6$$

$$\begin{cases} ap = 4 \\ f = 0.2 \end{cases}$$

$$a_{14} = \frac{1.155E - 07}{4^{1,295} \cdot 0.3^{2.99}} = 7.096E - 7$$

$$\begin{cases} ap = 4 \\ f = 0.3 \end{cases}$$

$$a_1 = \frac{a_{11} + a_{12} + a_{13} + a_{14}}{4}$$

$$a_1 = \frac{5.874E-6 + 1.741E-6 + 2.394E-6 + 7.096E-7}{4} = 2.685E-6$$

$$a_1 = 2.68E - 6$$

➤ **Détermination de a_1 :** pour

$$a_{11} = \frac{a_2}{Vc^{b1} \cdot f^{b3}}$$

$$\begin{cases} Vc = 100, 150, 200 \\ f = 0.2, 0. \\ a_2 = 0.184 \\ b_1 = 3.755 \\ b_3 = 1.295 \end{cases}$$

$$a_{111} = \frac{0.184}{100^{3.755} \cdot 0.2^{1.295}} = 7.074E - 10$$

$$\begin{cases} Vc = 100 \\ ap = 0.2 \end{cases}$$

$$a_{112} = \frac{0.184}{150^{3.755} \cdot 0.2^{2.99}} = 1.543E - 10$$

$$\begin{cases} Vc = 150 \\ f = 0.2 \end{cases}$$

$$a_{113} = \frac{0.184}{200^{3.755} \cdot 0.2^{2.99}} = 5.239E - 10$$

$$\begin{cases} Vc = 200 \\ f = 0.2 \end{cases}$$

$$a_{II4} = \frac{0.184}{100^{3.755} \cdot 0.3^{2.99}} = 1.196E - 10 \quad \begin{cases} Vc = 100 \\ f = 0.3 \end{cases}$$

$$a_{II5} = \frac{0.184}{150^{3.755} \cdot 0.3^{2.99}} = 2.069E - 10 \quad \begin{cases} Vc = 150 \\ f = 0.3 \end{cases}$$

$$a_{II6} = \frac{0.184}{200^{3.755} \cdot 0.3^{2.99}} = 8.858E - 11 \quad \begin{cases} Vc = 200 \\ f = 0.3 \end{cases}$$

$$a_{II} = \frac{a_{II1} + a_{II2} + a_{II3} + a_{II4} + a_{II5} + a_{II6}}{6}$$

$$a_{II} = \frac{7.074E-10+1.543E-10+5.239E-10+1.196E-10+2.069E-10+8.858E-11}{6} = 56.296$$

$a_{II} = 0.0301$

➤ **Détermination de a_{III} :** pour

$$a_{III} = \frac{a_3}{Vc^{b1} \cdot ap^{b2}}$$

$$\begin{cases} Vc = 100,150,200 \\ ap = 2, 4 \\ a_3 = 118.60 \\ b_1 = 3.755 \\ b_2 = 1,295 \end{cases}$$

$$a_{III1} = \frac{118.60}{100^{3.755} \cdot 2^{2.99}} = 2.912E - 5 \quad \begin{cases} Vc = 100 \\ ap = 2 \end{cases}$$

$$a_{III2} = \frac{118.60}{150^{3.755} \cdot 2^{2.99}} = 6.352E - 6 \quad \begin{cases} Vc = 150 \\ ap = 2 \end{cases}$$

$$a_{III3} = \frac{118.60}{200^{3.755} \cdot 2^{2.99}} = 2.175E - 6 \quad \begin{cases} Vc = 200 \\ ap = 2 \end{cases}$$

$$a_{III4} = \frac{118.60}{100^{3.755} \cdot 4^{2.99}} = 2.313E - 4 \quad \begin{cases} Vc = 100 \\ ap = 4 \end{cases}$$

$$a_{III5} = \frac{118.60}{150^{3.755} \cdot 4^{2.99}} = 5.047E - 5 \quad \begin{cases} Vc = 150 \\ ap = 4 \end{cases}$$

$$a_{III6} = \frac{118.60}{200^{3.755} \cdot 4^{2.99}} = 1.713E - 5 \quad \begin{cases} Vc = 200 \\ ap = 4 \end{cases}$$

$$a_{III} = \frac{a_{III1} + a_{III2} + a_{III3} + a_{III4} + a_{III5} + a_{III6}}{6}$$

$$a_{III} = \frac{2.912E-5+6.352E-6+2.175E-6+2.313E-4+5.047E-5+1.713E-5}{6} = 5.609E - 5$$

$$\mathbf{a_{III} = 5.609E - 5}$$

D'où :

$$K = a = \frac{a_I + a_{II} + a_{III}}{3}$$

$$K = \frac{2.68E-6+0.0301+5.609E-5}{3} = 0.010$$

$$\boxed{K = 0.010}$$

Enfin on déduit l'équation expérimentale qui s'écrit :

$$\mathbf{Vb = 0.01 (Vc)^{1.25} (ap)^{1.3} (f)^3} \quad \mathbf{(3.10)}$$

5. Variation de la fonction expérimentale

Nous allons faire varier la fonction expérimentale selon les conditions expérimentales pour observer son évolution Les conditions de variation sont les suivants :

- $100 < V_c < 200$ (m/mn)
- $0.2 < f < 0.3$ (mm/tr)
- $2 < ap < 4$ (mm)

5.1. Variation de la fonction pour une avance fixée

Les figures 3.6, 3.7 et 3.8, représentent la variation de la fonction d'usure (équation 3.10) en fonction de a_p et VC pour $f=0.1, 0.2$ et 0.3 mm/tr

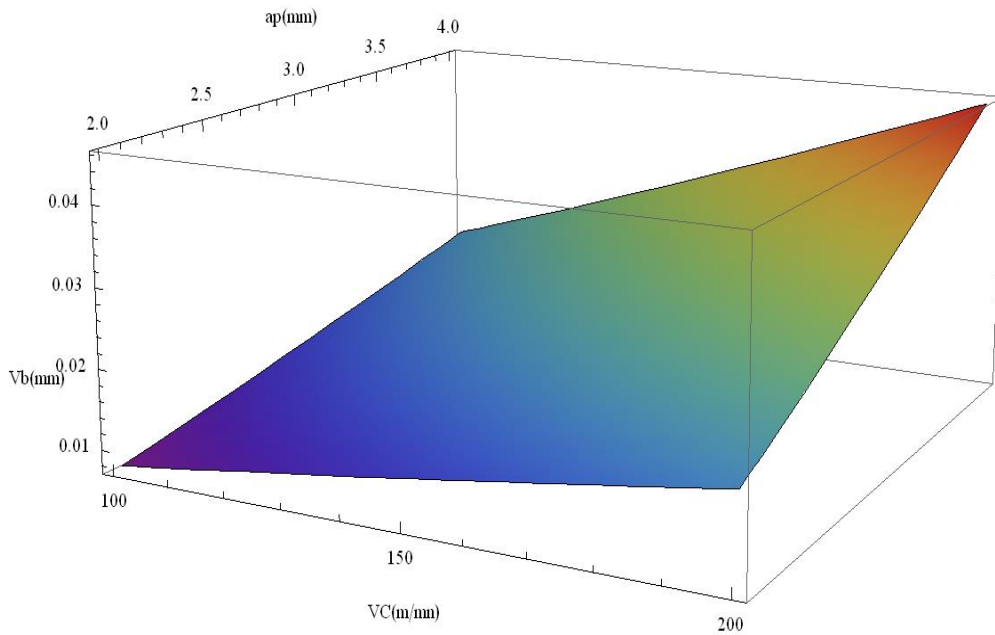


Figure 3.6 Variation de l'usure pour $f = 0.1$ mm/tr

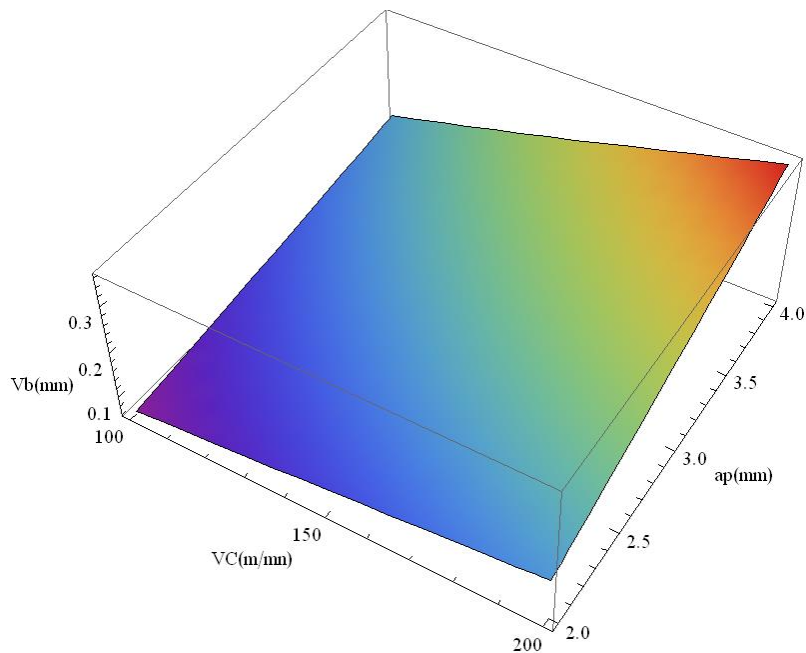


Figure 3.7 Variation de l'usure pour $f = 0.2$ mm/tr

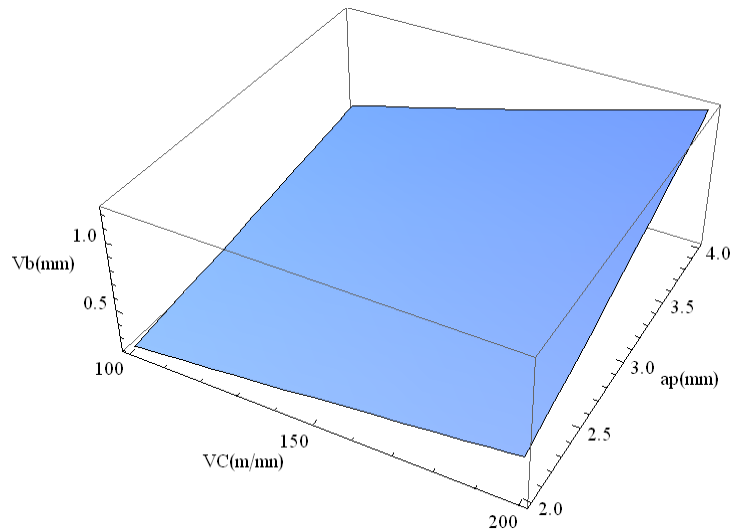


Figure 3.8 Variation de l'usure pour $f=0.3\text{mm/tr}$

5.2. Variation de la fonction pour une profondeur de passe fixée

Les figures 3.9, 3.10 et 3.11, représentent la variation de la fonction d'usure (équation 3.10) en fonction de V_c et f pour $a_p=2, 3$ et 4 mm

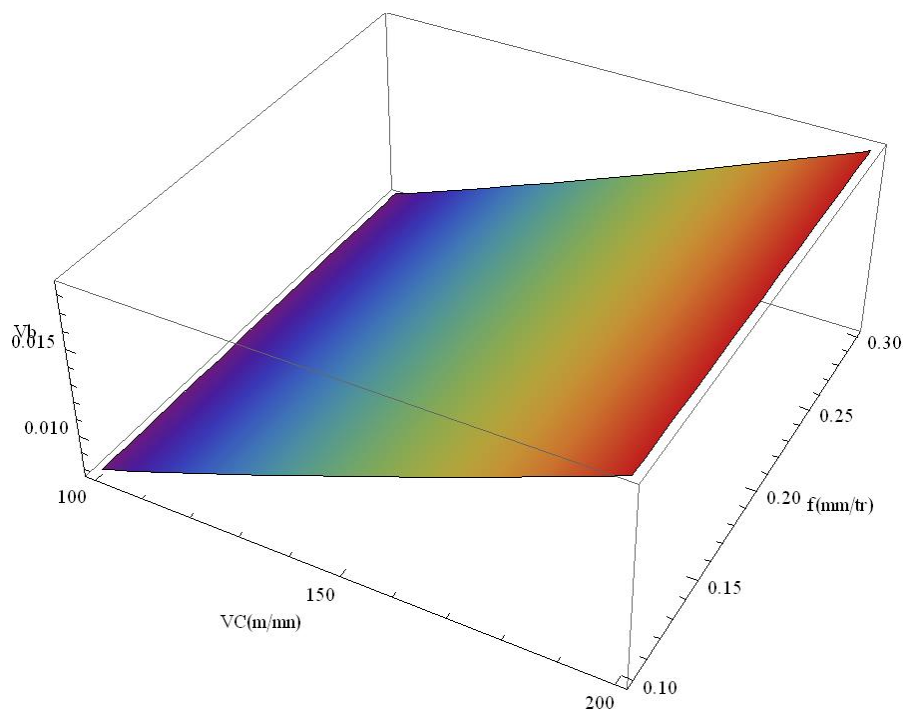


Figure 3.9 Variation de l'usure pour $a_p=2\text{mm}$

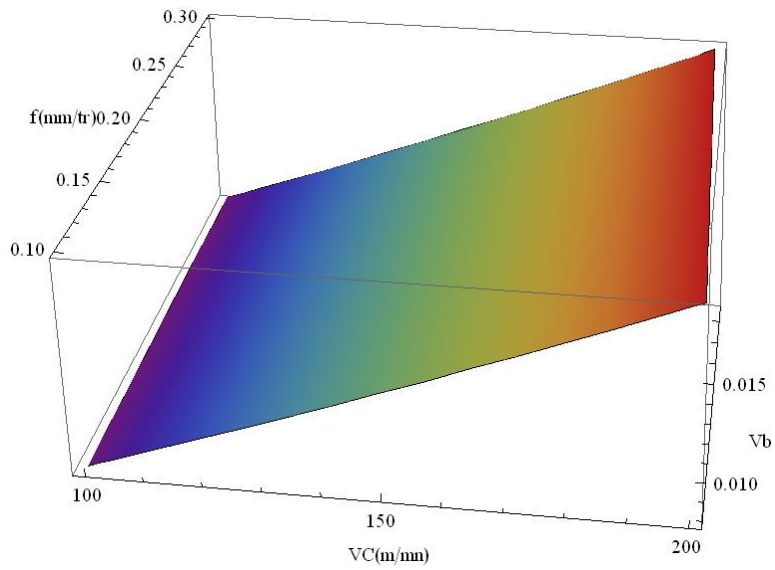


Figure 3.10 Variation de l'usure pour Variation de l'usure pour $a_p=3\text{mm}$

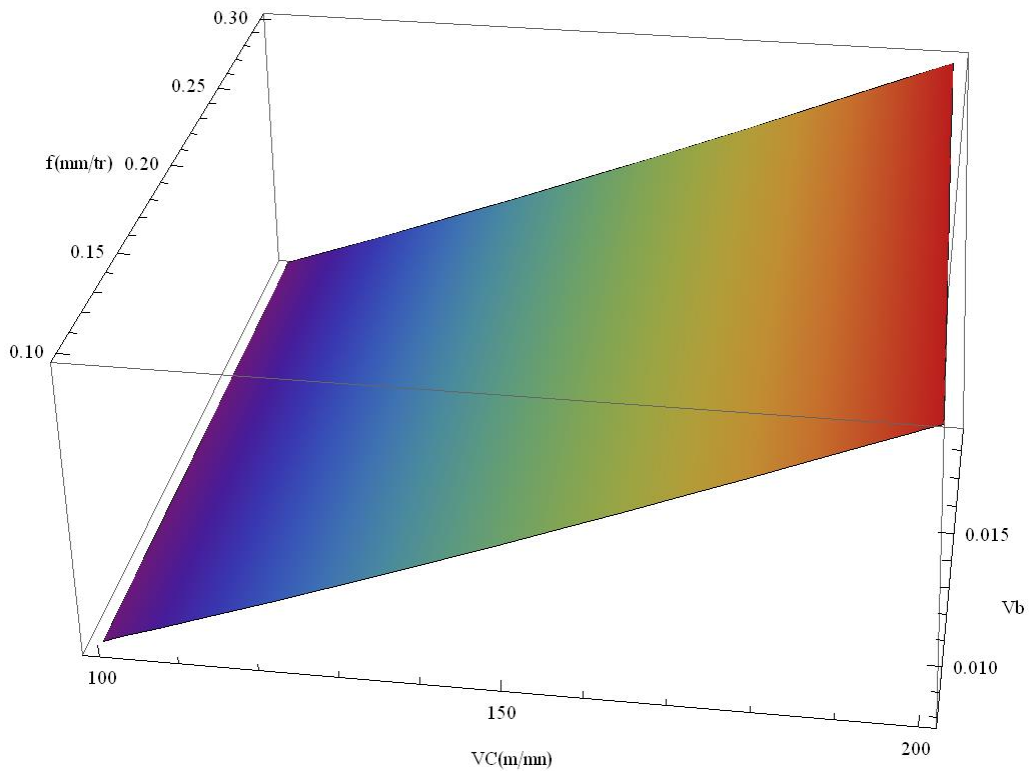


Figure 3.11 Variation de l'usure pour $a_p=4\text{mm}$

5.3. Variation de la fonction pour une vitesse de coupe fixée

Les figures 3.12, 3.13 et 3.13, représentent la variation de la fonction d'usure (équation 3.10) en fonction de a_p et f pour $V_c=100, 1450$ et 200 m/mn

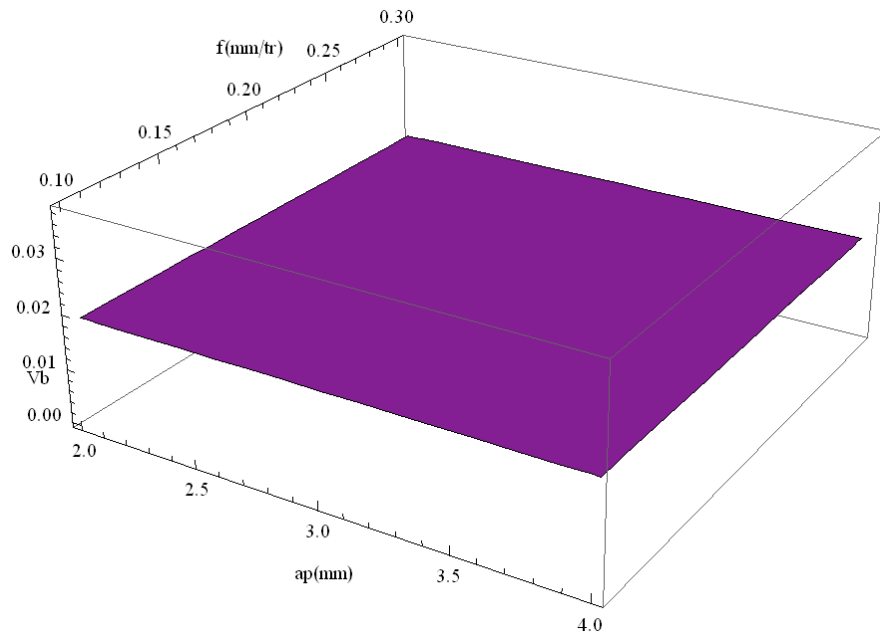


Figure 3.12 Variation de l'usure pour $V_c=100$ m/mn

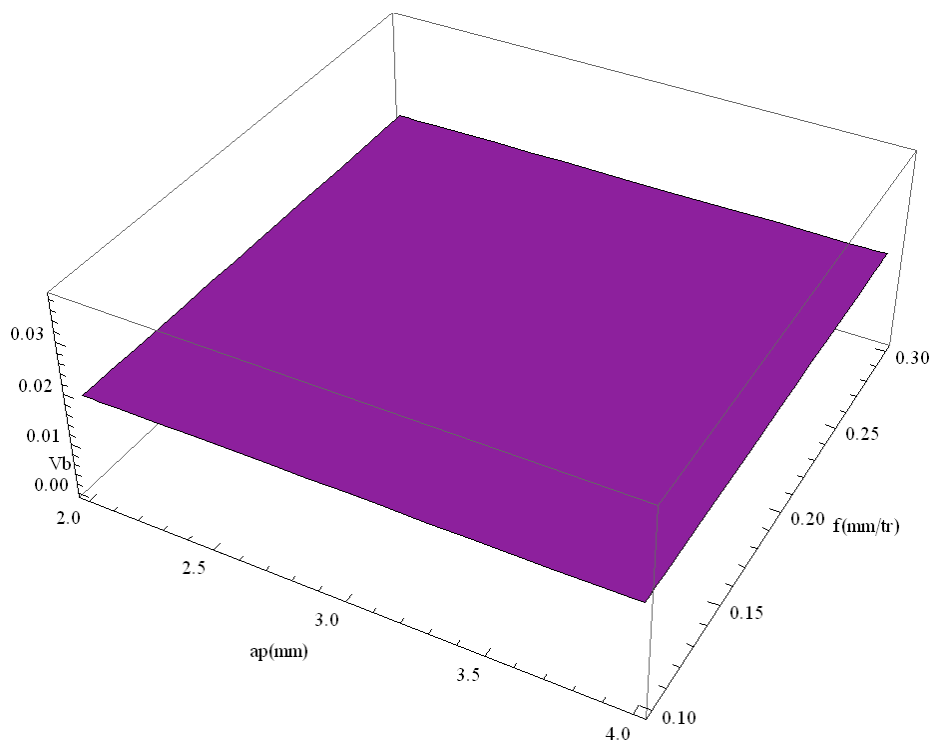


Figure 3.13 Variation de l'usure pour $V_c=150$ m/mn

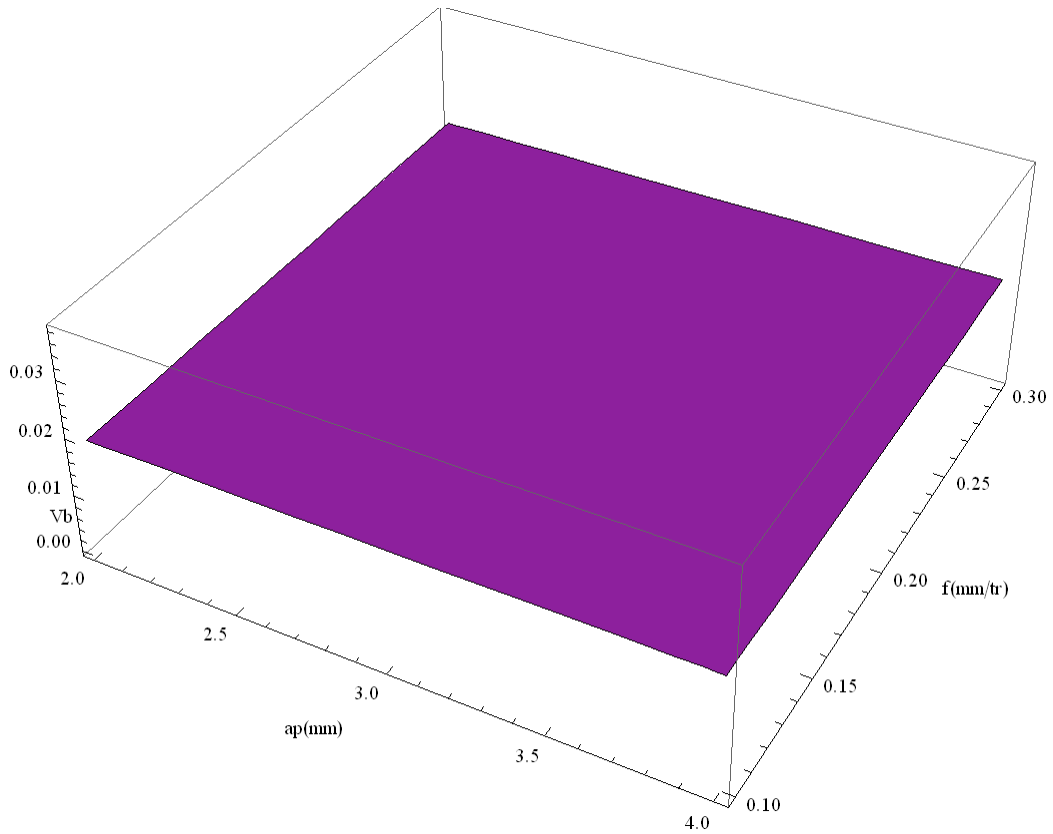


Figure 3.14 Variation de l'usure pour $V_c=200\text{m/mn}$

5.4. Discussion des résultats

Les différents graphes nous déduisons les valeurs maximales de l'usure, indiquées par le tableau 3.3.

f (mm/tr)	ap (mm)	Vc (m/mn)	Vb max (mm)	Conditions	Observations
0.1	4	200	0.04	100 < Vc < 200 et 2 < ap < 4 f fixe	Première compagne d'essais
0.2	4	200	0.4		
0.3	4	200	1.2		
0.3	2	200	0.018	100 < Vc < 200 et 0.1 < f < 0.3 ap fixe	Seconde compagne d'essais
0.3	3	200	0.018		
0.3	4	200	0.018		
0.1-0.3	2-4	100	0.02	2 < ap < 4 0.1 < f < 0.3 Vc fixe	Troisième compagne d'essais
0.1-0.3	2-4	150	0.02		
0.1-0.3	2-4	200	0.02		

Tab 3.3 Valeurs maximales de l'usure

Nous remarquons des graphes de la figure 3.6 à la figure 3.11, que la variation de l'usure suit une progression linéaire croissante en fonction de la croissance des conditions d'essais. Par contre en ce qui concerne les figures 3.12, 3.13 et 3.14, nous avons une progression constante pour les différentes valeurs des conditions d'essais.

En ce qui concerne les valeurs maximales nous remarquons la prépondérance de la première campagne d'essais sur les valeurs maximales, par rapport aux valeurs de la seconde et la troisième campagne, ou nous remarquons des valeurs presque constantes sans influences importantes sur la variation de f , a_p et V_c .

Nous remarquons entre autres que les valeurs maximales sont influencés par les valeurs maximales des conditions des essais et c'est pour cette raison que la valeur de l'usure maximale se situe pour les valeurs de $f= 0.3\text{mm/tr}$, $a_p =4\text{mm}$ et $V_C =200\text{m/mn}$. Par contre en gardant les valeurs de a_p et V_c maximale et en faisant diminuer l'avance f on peut faire diminuer la valeur de l'usure de dix fois.

6. Conclusion

Les différents résultats nous indiquent que les valeurs maximales sont tributaires des conditions maximales, ce qui ne veut pas dire que l'on ne peut pas travailler dans cette plage, mais il faut prendre des précautions particulières. Une autre solution consiste de garder les valeurs maximales de a_p et V_c , mais diminuer la valeur de l'avance ce qui fera diminuer la valeur de dix fois si on passe de 0.3 à 0.2mm/tr et de cent fois si on passe de la valeur de 0.3 à 0.1mm/tr. Par ce changement nous augmentons le temps de coupe, mais nous pouvons garder le même outil pour une longue période d'usinage. Donc la nécessiter de faire un compromis entre un travail de moindre usure ou économique.

Conclusion générale

Nous avons traité dans ce mémoire l'optimisation des conditions de coupes pour une opération de chariotage. Dans ce contexte nous avons passé en revue de quelques procédés d'usinage conventionnelles. Nous avons définis les différents paramètres de coupe ainsi que la géométrie de l'outil pour exécuter une opération d'usinage. Il en ressort qu'une complexité de celle-ci et induit des efforts de coupes ainsi que des températures qu'il faut évacuée par la lubrification abondante. Ce qui n'empêche pas la naissance de l'usure des outils quel que soit les conditions de coupes choisi, car ce dernier est un phénomène impossible à supprimer mais on peut le minimiser. Dans ce contexte nous avons passé en revues les différents types d'usures et les différents modèles ayant traités ce sujet. Il en ressort que toutes les études jusqu' à présents sont expérimentales et qu'il existe différents modèles. Par contre le choix d'un tel ou tel model se fait par les conditions préétablis de ce que l'on veut chercher, il reste que le modèle de Taylor reste le plus simple à cause des simplifications qu'il offre pour son établissement. C'est pour cette raison que nous avons choisi cette approche pour établir une fonction dimensionnelle par la méthode de l'analyse grapho analytique pour déterminer les conditions optimales d'une opération de chariotage. Il en ressort des différents résultats que les valeurs maximales sont tributaires des conditions maximales de coupes, ce qui ne veut pas dire que nous ne pouvons pas travailler dans cette plage, mais il faut prendre des précautions particulières. Une autre solution consiste de garder les valeurs maximales de a_p et V_c , mais diminuer la valeur de l'avance ce qui fera diminuer la valeur de dix fois si on passe de 0.3 à 0.2mm/tr et de cent fois si on passe de la valeur de 0.3 à 0.1mm/tr. Par ce changement nous augmentons le temps de coupe, mais nous pouvons garder le même outil pour une longue période d'usinage, D'où la nécessiter de faire un compromis entre un travail de moindre usure ou économique.

Références bibliographiques

- [1] **Bencheikh**, document doctora_T_2018.
- [2] **A. Toumine**, usinage, INSA de Lyon, Groupe conception- productique, 2007
- [3] **F. Valiorgue**, 2008. Simulation des processus de génération de contraintes résiduelles en tournage du 316L. Nouvelle approche numérique et expérimentale, Thèse de doctorat, Ecole Supérieure des Mines de Saint-Etienne 2008.
- [4] théorie et modélisation de la coupe
- [5] **G.S. Sekhon, J.L. Chenot**, Numerical simulation of continuous chip formation during nonsteady orthogonal cutting, Eng. Comput. 10 (1993).
- [6] **REMLI Fethi**, L'effet d'usinage par tournage sur un acier XC18, 16 octobre 2016
- [7] **G. Beranger, G. Henry, G. Sanz**, " Livre de l'acier", Ed Sollac, 1996.
- [8] **A. Roos, B. Milet**, " Précis de métallurgie Appliquée", Edition Technique et Documentation- Lavoisier (1982)
- [9] www.analyse-fabrication.univ-lille.fr
- [10] <https://pixabay.com/>
- [11] **Alexandre Mondelin**, Modélisation de l'intégrité des surfaces usinées Application au cas du tournage finition de l'acier inoxydable 15-5PH. Thèse de l'université de Lyon.
- [12] **W.S. Lin, B.Y. Lee, C.L. Wu**, Modeling the surface roughness and cutting force for turning, J. Mater. Proc. Tech. 108 (2001) 286-293.
- [13] Document Doctorat "Modélisation de la coupe en Usinage à Grande Vitesse".
- [14] **J. D. Puerta Velasquez**, Étude des copeaux et de l'intégrité de surface en usinage à grande vitesse de l'alliage de titane TA6V. Thèse de doctorat, de l'Université de Metz.
- [15] Bourdet P.- La coupe des métaux – polycopé de la CODEGEM de l'ENS de Cachan.
- [16] **Michel BARQUINS** « La Tribologie La Science pour maîtriser et comprendre le frottement et l'usure » ESPCI - 10, rue Vauquelin - 75231 Paris Cedex 05 1994
- [17] **BELLOUFI**, Cours procédés de fabrication – Master / Maintenance industrielle , Université Kasdi MERBAH Ouargla – Algérie, 2010.
- [18] **OPTIZ H ;KONIG W**, on the wear of cutting tools . 8th M.T.D.R Conference 1967, Montreal, pp.173-189
- [19] **P. CHRISTAN** : « comportement de revêtements céramiques sur outil en

tournage à sec finition », Ecole centrale de Lyon, 2003

- [20] Loi d'usure des outils – Lois d'usure du 21\03\10 B.D.V.S
- [21] **MARTIN P , RICHARD J , VERON M**, the influence of cutting speed variations on tool wear for optimal control of machining. Annals of the CIRP , 1979,Vol 28, n°1,pp.7-11
- [22] **BER A, GOLDBLAT M**, the influence of temperature gradient on cutting tool's life.annals of the CIRP, 1989, Vol 381, n°1,pp.69-73
- [23] **FRANCOIS LEROY** Ingénieur Civil des mines , docteur en sciences physiques, chargé de la direction du laboratoire d usinabilité et de mise en forme d'ASCOMETAL (groupe usinor-sacilor)
- [24] **F. AMIER**; Etude comportementale de l'outil -pièce en tournage - mémoire de Magister- ENPOran 10/04/2014.
- [25] **GD Gridine- A.Noureddine**; La référence de la méthode grapho analytique: Travaux pratiques d'atelier (Conseil méthodologiques. ENSET Oran 1987.