

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed

BOUDIAF

Faculté de Génie Mécanique

Département de Génie Mécanique

Polycopié de

Coupe des Métaux
en Fabrication Mécanique et
Productive

Dr. BENNEGADI Mohammed El Larbi

-2018-

PREFACE

Par, le présent polycopié, on a essayé de donner les notions de base sur les différents procédés de fabrication permettant d'obtenir de pièces finies ou Semi finies par coupe de métal. Il s'agit d'un support de cours avec des illustrations claires du phénomène de la coupe par outil tranchant. Ce cours est destiné aux étudiants de master de spécialité fabrication mécanique et Productique en Génie Mécanique. Le contenu de ce polycopié est largement inspiré des documents et sources citées dans les références bibliographiques. Dans cette matière, les étudiants auront tout d'abord des définitions générales sur les procédés de fabrication, par la suite des détails sur l'analyse de la formation de copeau, les conséquences d'un mauvais choix des conditions de coupe lors de l'usinage d'une pièce mécanique.

Ce polycopié n'a pas d'autre but que d'aider nos étudiants de LMD à acquérir le maximum d'informations afin d'assimiler le phénomène de la coupe d'un métal.

SOMMAIRE

CHAPITRE. I. Généralité de la Fabrication Mécanique.....	1
LES PROCEDES D'USINAGE.....	1
Tournage :.....	1
Fraisage :.....	2
Rectification :.....	2
Configurations d'usinage.....	3
Conditions de coupes.....	3
Classification des outils de coupe.....	4
Coupe orthogonale.....	5
Coupe oblique.....	5
Références.....	6
CHAPITRE. II. Outils de coupe et leurs nuances.....	7
Forme et géométrie des outils de coupe :.....	8
Plans références d'outil en main [2].....	8
Remarque II.1.....	9
Influence sur la coupe et définition des principaux angles [5,6].....	10
Remarque II.2.....	12
Faciès des pièces en usinage.....	12
Opérations d'usinage et ses faciès.....	13
En Tournage.....	13
En fraisage.....	14
Nature des matériaux des outils de coupe.....	14
Aciers rapides.....	16
Remarque II.3.....	16
Carbures métalliques.....	16
Carbures revêtus.....	16
Céramiques.....	17
Cermets.....	17

Nitru de bore cubique NBC	17
Damant.....	17
Référence	18
CHAPITRE. III. Analyse de la formation du copeau	19
Caractérisation de la coupe des métaux.....	19
Définitions :	19
Phénomènes physiques en usinage	20
Formation du copeau	20
Zones d'élaboration du copeau.....	22
Formes du copeau en usinage.....	24
Coupeaux continus.....	25
Copeaux discontinus	25
Remarque III.1	26
Références.....	28
CHAPITRE. IV. Endommagement et usure des outils:	29
Définition de l'usure.....	29
Modes d'usure en usinage	30
Usure par abrasion	30
Usure par adhésion.....	30
Usure par fissuration.....	30
Usure par déformation plastique de l'outil	30
Usure par diffusion	30
Usure par corrosion.....	30
Remarque IV.1	31
Critères d'usure	32
Paramètres d'usure d'outil de coupe	33
Usure en cratère	33
Usure en dépouille	33
Remarque IV.2.....	35

Durée de coupe d'un outil:	36
Modèle de Gilbert ou le modèle de Taylor généralisé en 1950	38
Modèle de Colding en 1959	39
modèle de Konig-Depiéreux en 1969	39
Modèle de Kronenberg en 1970.....	39
Remarque IV.3.....	39
Exemples.....	40
Réponse.....	40
Première méthode (Méthode graphique)	42
Résolution N° 1.....	42
Résolution N° 2.....	43
Remarque IV.4.....	44
Deuxième méthode	44
Référence	45

INTRODUCTION

Ce polycopié propose aux étudiants de master en Génie Mécanique un ensemble de connaissances indispensables et nécessaires pour comprendre et assimiler le phénomène de la coupe des métaux lors de la fabrication et le façonnage d'une pièce mécanique, par l'introduction des procédés d'usinage et l'action de l'outil sur la pièce, par le mode de décohésion et l'écoulement du copeau sur l'outil, les frottements naissant entre l'outil, la pièce et le copeau, en introduisant le calcul d'usure suivant plusieurs théories. Des méthodes classiques de calcul des effets mécaniques prises en compte lors de l'action d'usinage (outil-pièce) et par ces calculs l'estimation de la puissance de coupe nécessaire à l'évaluation de l'énergie utile pour la machine-outil utilisée. Par la connaissance de ces données de la coupe l'étudiant peut corriger et également définir de nouvelles paramètres de coupe dans le but de minimiser ou d'orienter les actions mécaniques pour limiter leur impact sur l'état des surfaces usinées et delà amélioré le rendement et la productivité.

Ce document est structuré en quatre chapitres présentés comme suit :

Le chapitre I est consacré à des généralités et rappels en fabrication mécanique.

Le chapitre II donne une description détaillée de la géométrie des outils de coupe qui selon le type d'opération d'usinage à exécuter.

Le chapitre III expose le mode de formation de copeau pendant l'opération d'usinage, les principaux types de copeaux et leurs définitions tout en donnant un aperçu sur l'évolution du copeau en fonction de la vitesse de coupe V_c et de sa section.

Le chapitre IV présente une généralité sur le phénomène d'usure, les différents types d'usures d'outil rencontrés en fabrication mécanique lors de la coupe des métaux et les méthodes fondamentales de calcul de la durée de vie d'un outil comme : le modèle de Taylor,...etc.

CHAPITRE. I.Généralité de la Fabrication Mécanique

Le mode est en évolution perpétuelle et par conséquent le domaine de la fabrication mécanique n'échappe pas à l'exception. Les procédés de fabrication par enlèvement de matière par ses nouveaux techniques et techniques d'usinage ont permis de prendre le pas avec les autres domaines de fabrications comme : la déformation à froid, la déformation à chaud, le moulage, l'ajout de matière, etc.).

L'enlèvement de matière nécessite l'emploi d'un élément physique permettant d'extraire de la matière d'un volume de base appelé brut (bloc, barre, plaque,) dans le but d'obtenir une pièce finie ou semi-finie. Dans cette catégorie d'opérations plusieurs techniques sont à citer :

- a. Le tournage ;
- b. Le fraisage ;
- c. La rectification ;
- d. L'électro-érosion ;
- e. La découpe sciage, oxycoupage, plasma, laser, jet d'eau, ...

L'enlèvement de matière ou usinage par les procédés classiques comme le tournage, le fraisage et la rectification ont recours très souvent à des éléments tranchants (outil de coupe) dont la résistance et la géométrie sont spécifiques et l'interaction entre la pièce et l'outil de coupe en mouvement relatif produit par arrachement du copeau.

LES PROCEDES D'USINAGE

L'évolution des machines-outils et l'outil de coupe ont permis d'améliorer leur rendement, leur sécurité, leur rigidité, leur dynamique (vitesse, accélération), leur puissance, et leur productivité.

Dans une première partie, les bases essentielles en usinage sont de définir les différents modes obtention de pièces mécaniques. Comme on l'a présenté auparavant, il existe trois principaux types (tournage ; fraisage ; rectification) dont deux qui mettent en jeu des outils de coupe à partir active possédant un à plusieurs arêtes tranchantes, par contre le troisième procédé il met en action un outil abrasif (meule).

Tournage :

le tournage est le procédé d'usinage qui permet l'obtention de pièces de révolutions (de forme cylindrique ou/et conique) à l'aide d'outils tranchants sur des machines appelées



Figure.I.1. Images de différents opérations en tournage industrielles [coromant.Sandvik.com/fr].

Fraisage :

Le fraisage est un procédé d'usinage où la génération de surfaces plane résulte de la combinaison du mouvement de rotation de l'outil de coupe (la fraise) et du mouvement d'avance donné à la pièce à usiner.



Figure.I.2. Images de différents opérations en fraisage industrielles [coromant.Sandvik.com/fr].

Rectification :

La rectification est une opération de finition de surface plane ou cylindrique afin d'améliorer l'état de surface de la pièce semi-finie. L'outil mis en action est appelé meule et la matière est extraite par abrasion.



Figure.I.3. Images de différentes opérations en rectification. [luxalp.com et impresa-web.fr]

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.

Conditions de coupes

Pour pouvoir réaliser une pièce par enlèvement de matière trois grandeurs doivent être réunies: (Figure I.4)

1. Vitesse de coupe V_c ou N – mouvement primaire (mouvement de coupe)

La vitesse de rotation la broche est donnée par l'équation suivante :

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

avec D : diamètre de la pièce pour le tournage ou diamètre de la fraise et du foret respectivement pour les opérations de fraisage et de perçage.

2. Mouvement d'avance f – mouvement secondaire
3. profondeur de passe a_p – pénétration de l'outil en dessous de surface de travail d'original

Pour certaines opérations, la quantité de matière enlevée peut être déterminée comme suite :

$$Q = V_c \cdot f \cdot a_p$$

où V_c : Vitesse de coupe; f : vitesse d'avance et a_p : profondeur de passe.

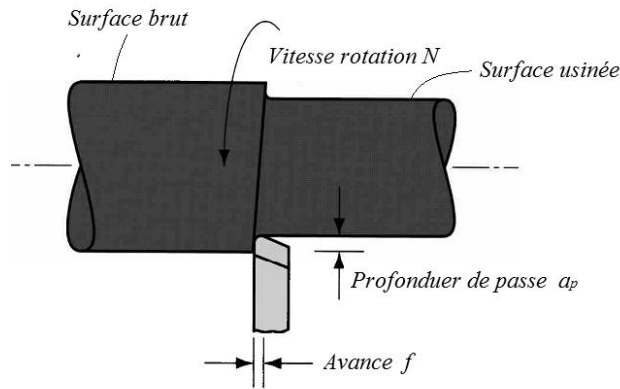


Figure.I.4. Conditions de coupe en tournage [1].

Classification des outils de coupe

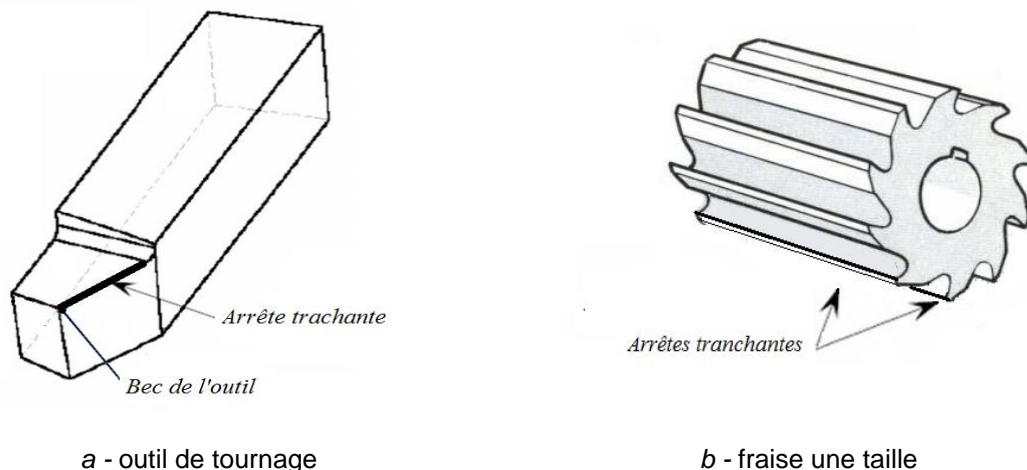
Les machines-outils utilisent une grande gamme d'outils d'usinage et cela selon le type d'opération et la forme de la pièce à réaliser. On distingue deux classes :

1. Outils à arrête unique:

Ce type d'outils a la particularité d'avoir une seule arrête tranchante, ils sont uniquement utilisés en tournage et en rabotage (Étau limeur), leur pointe est généralement arrondie pour former un rayon de bec d'outil. (Figure I.5.a)

2. Outils à arrête multiples:

Ces outils comme leur nom l'indique possèdent plusieurs arrêtes tranchantes et sont de forme cylindrique. On les utilise dans les opérations de parçage, d'alésage et de fraisage où le mouvement de coupe est leurs attribué. (Figure I.5.b)



a - outil de tournage

b - fraise une taille

Figure.I.5. Exemple d'outil de coupe

Coupe orthogonale

La coupe orthogonale est la configuration la plus simple pour usiner une pièce. Cette configuration est actuellement est peut employer dans le monde industriel. En effet, dans la pratique, seuls quelques procédés classiques permettent d'obtenir ces conditions comme par exemple le rabotage, le tournage de tube en bout et l'usinage de palier.

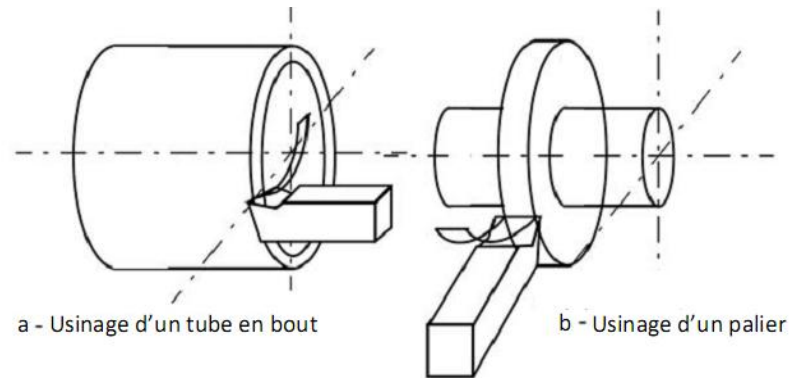


Figure.I.6. Configuration de la coupe orthogonale, [2].

La figure I.6 met en situation la coupe orthogonale au moment où l'outil coupe la matière avec une seule arête tranchante et lorsque cette dernière est perpendiculaire à la vitesse d'avance et à la vitesse de coupe V_c .

Coupe oblique

Une deuxième représentation schématique de la formation du copeau où on peut la rencontrer dans la plupart des procédés d'usinage sur machine-outil, est la coupe oblique (Figure I.7 - b).

En coupe oblique, l'arête de coupe est orientée d'un angle d'inclinaison λ_s par rapport à la normale de la direction de coupe (dans le plan contenant V_c et l'arête, Figure I.7 - b et I.8). [Albert, 2010]

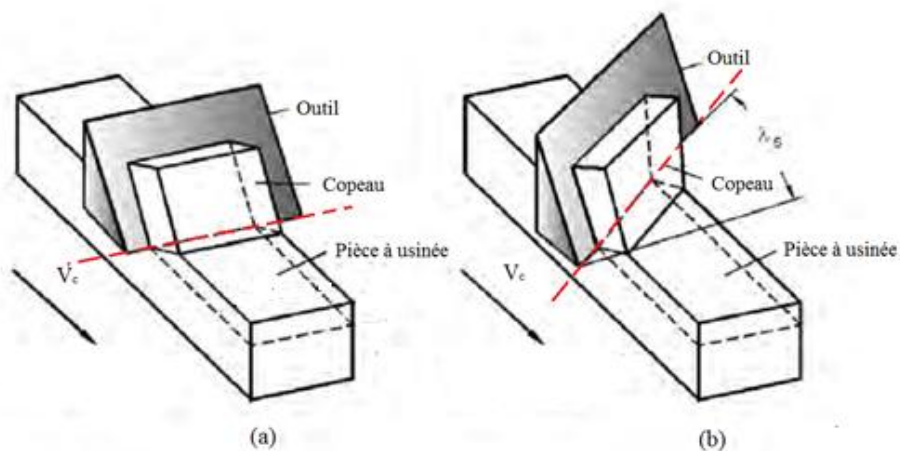


Figure.I.7. Illustration de la coupe orthogonale et oblique [3].

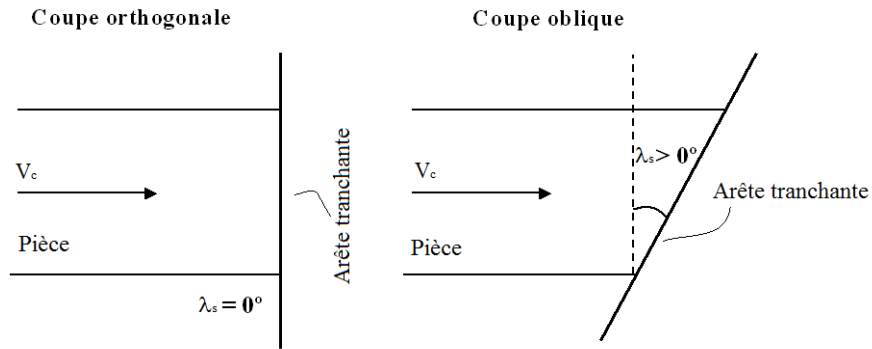


Figure.I.8. Schéma des directions de l'arête en coupe orthogonale et oblique

Ajouter une inclinaison λ_s à l'outil permet d'analyser la coupe, par une approche plus réaliste et ainsi l'étude de la formation du copeau dans le cas le plus général. Cependant, la coupe oblique n'est qu'une transposition du cas orthogonal par rotation du plan de cisaillement (Figure I.6), mais l'étude du cas général de coupe des métaux s'avère le plus complexe.

Par conséquent, nous limiterons dans les prochains chapitres à seulement aux observations et analyses de la coupe orthogonale.

Références

- [1] John Wiley & Sons, Fundamentals of Modern Manufacturing, 2nd edition Inc. M. P. Groover, 2002.
- [2] C. Le Calvez ,Etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone, Thèse de doctorat de l'ENSAM – Paris, 1995.
- [3] V.P. Astakhov, Geometry of Single-point Turning Tools and Drills / fundamentals and practical applications, Springer-Verlag – London, 2010.
- [4] A. Passeron. Tournage, Techniques de l'Ingénieur, 1998.

CHAPITRE. II. Outils de coupe et leurs nuances

Les fabricant d'outils de coupe fournissent aux artisans et manufactures des outils avec des géométries différentes et des prix différents selon les opérations d'usinage voulues (tournage, fraisage, perçage, ...etc.) et sous différents aspects : outils en bloc en acier rapide, outils à plaquettes brasées et en plaquettes amovibles. (Figure II.1).

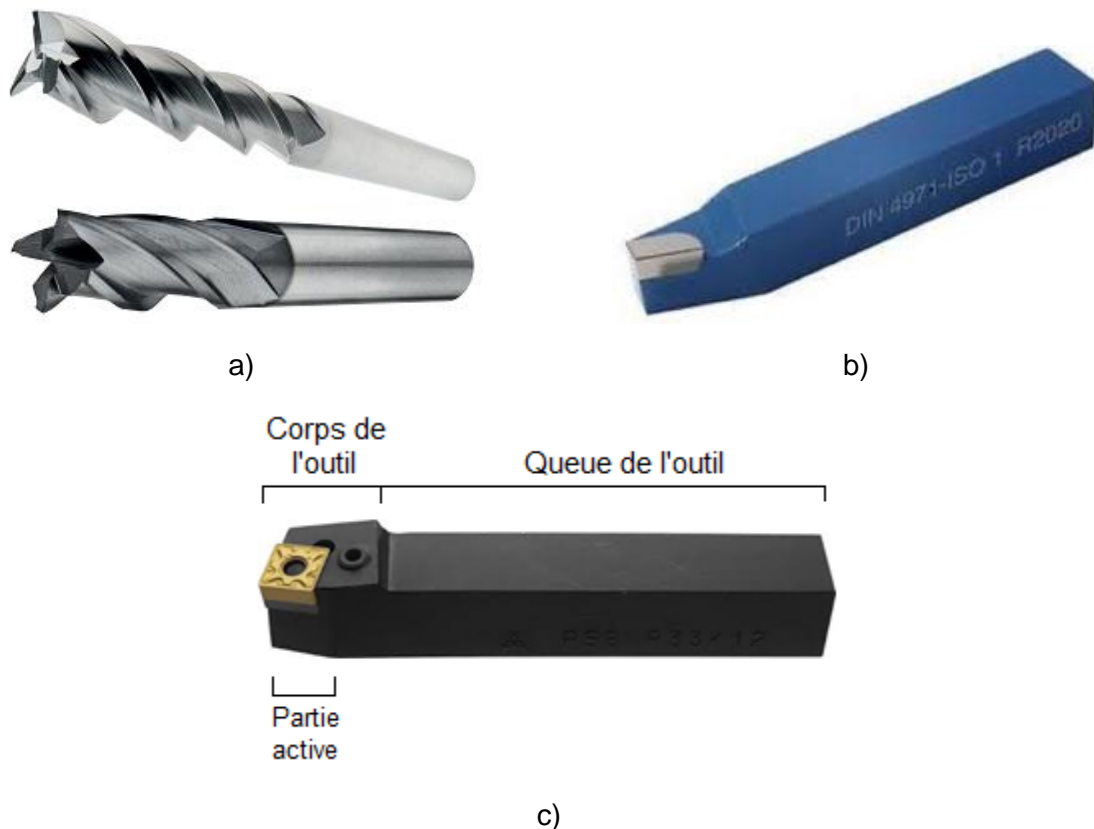


Figure.II.1. Présentation des différents types d'outils : a) Fraises monobloc en acier rapide, b) Outils à charioter plaquettes brasée c) Outils à charioter à plaquettes amovibles.

En général un outil de coupe est constitué d'un corps et d'une queue (Figure II.1), cette dernière est de section circulaire ou carrée et a pour rôle le maintien de l'outil au porte-outil (la tourelle en tournage, la broche en fraise et perçage), la première partie est destinée à recevoir les éléments tranchant ou les plaquettes. L'élément coupant est limité par des faciès dont l'intersection forme les arêtes (Figure II.2). Seules les arêtes, la face de coupe et la face de dépouille qui interviennent dans le processus de la coupe du métal, c'est ces derniers qui forment la partie active.

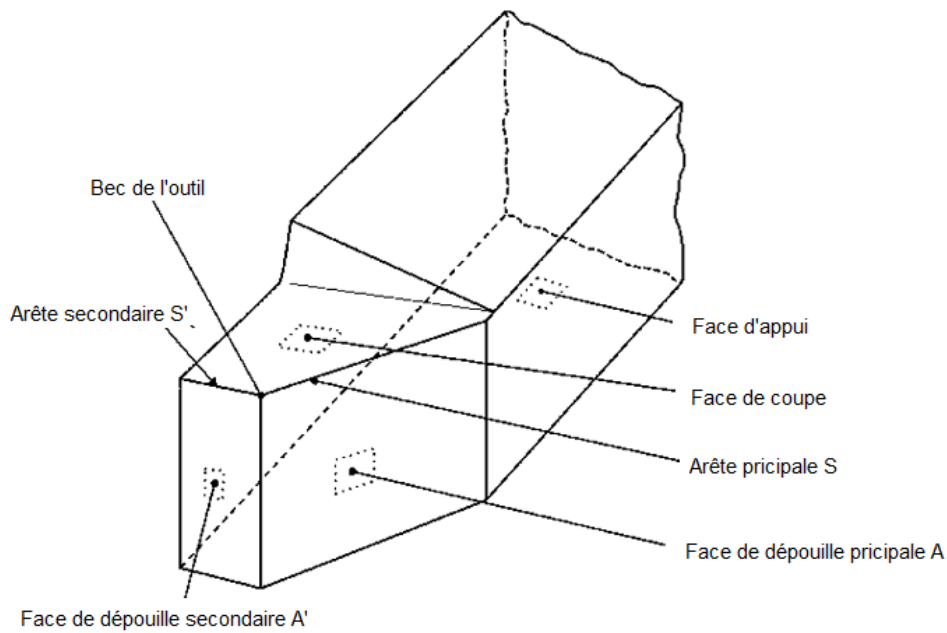


Figure.II.2. *Faciès limitant la partie active de l'outil.[1]*

FORME ET GEOMETRIE DES OUTILS DE COUPE :

Les outils de coupe se caractérisent par leurs matériaux et les différents paramètres géométriques de sa partie active. Il est nécessaire de définir les différents angles caractéristiques de l'outil. Ces derniers sont établis selon les plans de références dans le système de l'outil en main (Figure II.3).

Plans références d'outil en main [2]

Les plans établis pour observer les différentes sections orthogonales de la partie active de l'outil sont les suivantes :

- P_r : plan parallèle à la face d'appui de l'outil.
- P_s : plan tangent à l'arête et perpendiculaire à P_r .
- P_o : plan contenant la vitesse de coupe théorique V_c au point de l'arête et perpendiculaire à P_r et perpendiculaire à P_s (P_o est incliné par rapport à V_f).
- P_n : plan perpendiculaire à P_o et perpendiculaire à l'arête.
- P_f : plan perpendiculaire à P_r et parallèle à la vitesse d'avance V_f .

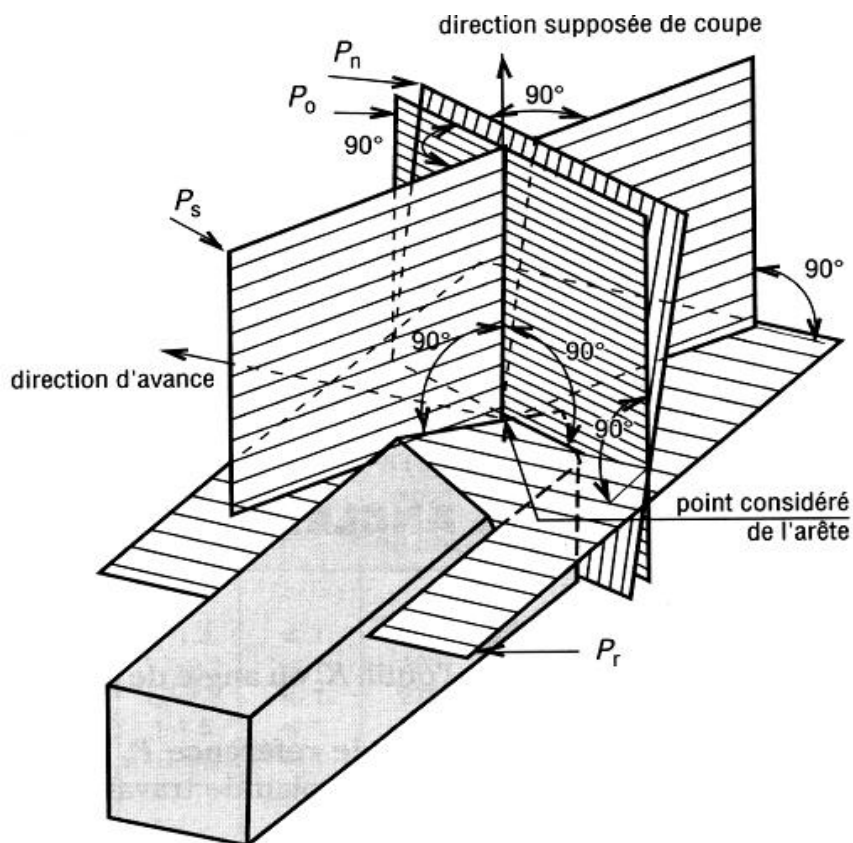


Figure.II.3. Plans sur un outil en main [Norme NF E 66-502] et [3]

À partir de ses plans on peut définir des systèmes d'angles selon chaque section voulue en notant toujours les désignations d'angles suivants :

- α : angle de dépouille principal
- β : angle de taillant
- γ : angle de coupe
- ψ : angle de direction complémentaire de l'arête

pour distinguer les angles de coupe d'un plan à l'autre, on attribue l'indice du plan choisi pour chaque angle observé dans sa section.

Exemple : Sur le plan P_f , les angles observés sont : α_f , β_f et γ_f .

Remarque II.1

Le choix de ces paramètres dépend directement de la forme de l'outil de coupe et sa nuance, de la matière de la pièce à usiner, du type de machine outil et de l'opération à exécuter et des contraintes de finition du produit exigé.

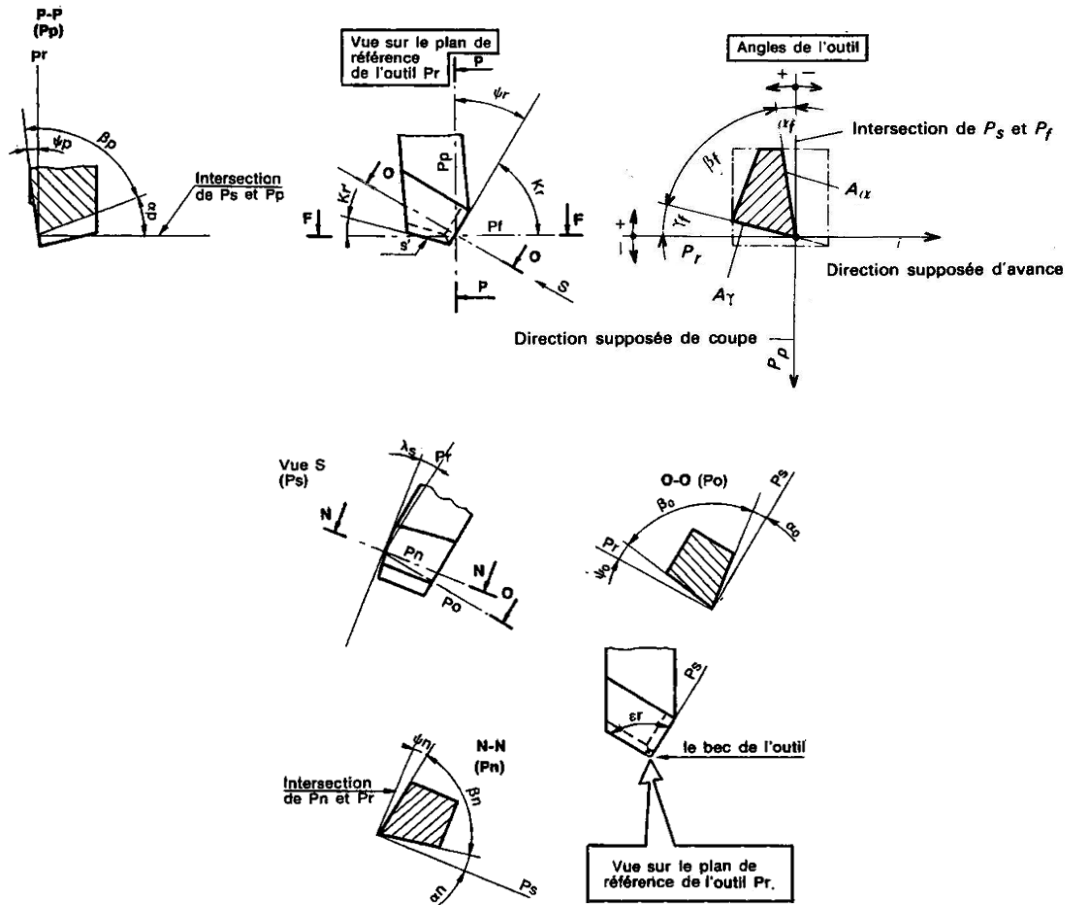


Figure.II.4. Angles de coupe sur un outil en main [4]

INFLUENCE SUR LA COUPE ET DEFINITION DES PRINCIPAUX ANGLES [5,6]

L'angle de **direction d'arête principale** K_r est l'angle mesuré dans le plan de référence P_r entre le plan d'arête de l'outil P_s et plan de travail conventionnel P_f . L'angle de direction d'arête est un facteur déterminant dans le choix de la machine suivant sa puissance.

- pour des valeurs $K_r < 90^\circ$ on a une entrée en contact progressif de l'arête de coupe avec la matière à usiner ;
- pour des valeurs trop petites de K_r la longueur de contact arête de coupe/matière augmente, ce qui provoque également une augmentation des efforts de coupe ;
- l'angle K_r influe aussi sur la direction d'évacuation des copeaux

L'angle de **direction d'arête secondaire** K_r' est l'angle mesuré dans le plan de référence P_r entre et la face de dépouille et le plan de travail conventionnel P_f

L'angle de **inclinaison d'arête** λ_s est l'angle mesuré dans le plan d'arête de l'outil P_s entre l'arête et le plan P_r :

- les outils avec $\lambda_s < 0^\circ$ s'utilisent pour des usinages d'ébauche, en raison de la robustesse de l'arête de coupe, et de la bonne fragmentation des copeaux ;
- les outils avec $\lambda_s > 0^\circ$ s'utilisent pour des usinages de finition, les valeurs du copeau minimum étant plus faibles.

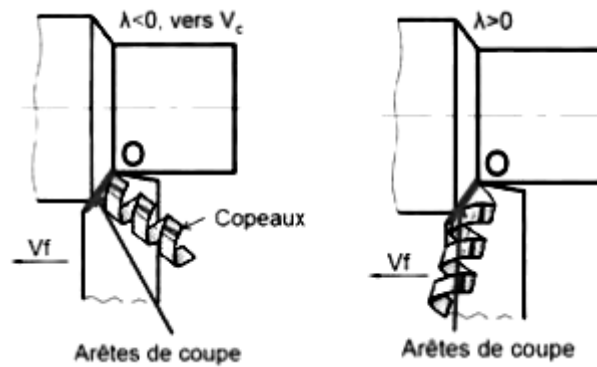


Figure.II.5. Influence de l'angle d'inclinaison d'arrête le sens d'écoulement du copeau.

L'angle de **dépouille** α est l'angle entre le plan d'arête de l'outil Ps et la face de dépouille.

- si l'angle α est trop grand, l'outil présente une arête trop fragile ;
- si l'angle α est trop petit la surface de contact pièce/face de dépouille augmente, ce qui induit le risque de talonnage

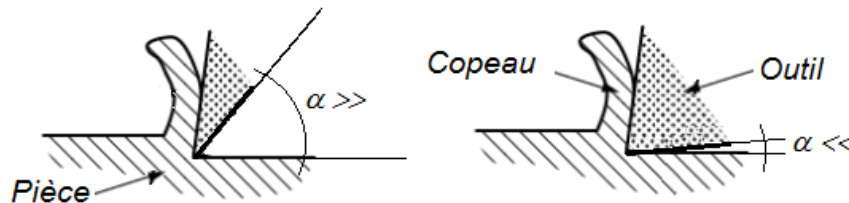


Figure.II.6. Influence de l'angle de dépouille.

L'angle de **taillant** β est l'angle entre la face de dépouille et la face de coupe.

l'angle de **pointe** ε_r est l'angle mesuré dans le plan de référence Pr entre la face de dépouille principale et la face de dépouille secondaire.

L'angle de **coupe** γ est l'angle entre la face de coupe et le plan de référence Pr . L'angle de coupe est un paramètre décisif dans la formation du copeau et selon le matériau à usiner, il peut passer d'une valeur positive à une valeur très négative. (Figure II.8)

- un angle γ trop grand fragilise l'arête et provoque un écoulement continu de copeau ;
- un angle γ trop petit provoque le frottement du copeau sur la face de coupe ;
- des valeurs $\gamma < 0$ sont réservées aux outils en carbure métallique et en céramique, en raison de la bonne tenue aux efforts et du fait que les copeaux se brisent facilement

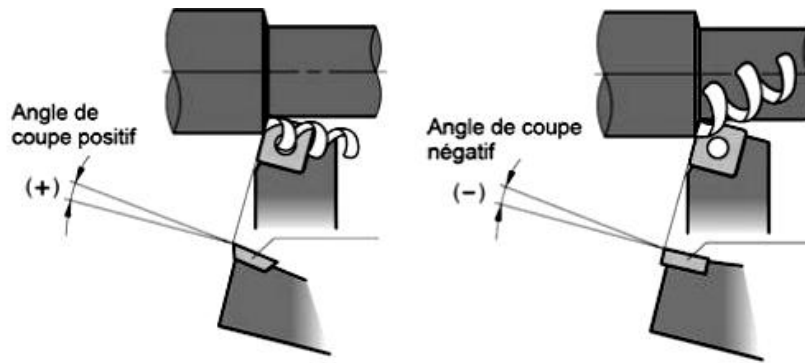


Figure.II.7. Influence de l'angle de coupe le sens dégagement du copeau.

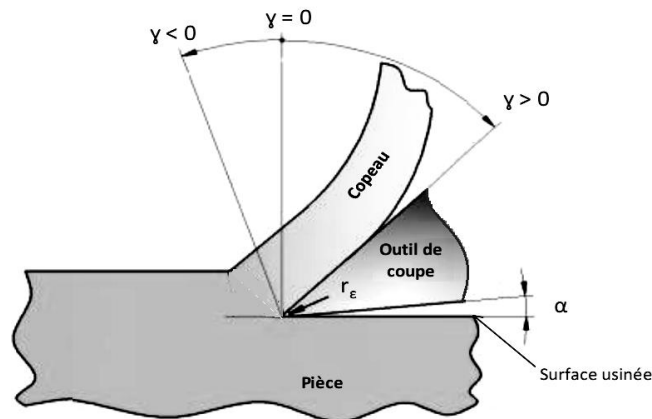


Figure.II.8. Position de l'angle de coupe en usinage.[9]

Exemple : Pour l'usinage des aciers durs l'outil doit être plus résistant mécaniquement et thermiquement, en conséquent l'angle de coupe doit être très faible voire négatif qui peut y aller jusqu'à -20 degrés.

Remarque II.2

La somme de ces trois angles de dépouille, taillant et de coupe est toujours égale à 90° .

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

Dans le cas où la somme de α et de β est supérieure à 90° , on travaille en coupe négative (γ est négatif).

Les angles de direction d'arête principale K_r , de pointe de l'outil ϵ_r , et de direction d'arête secondaire K_r' leur somme est égale à 180° .

$$K_r + \epsilon_r + K_r' = 180^\circ$$

FACIES DES PIÈCES EN USINAGE

Il important d'identifier les différents faciès d'une pièce prévu pour un usinage. Ces surfaces sont appelées *surfaces de la pièce*. Elles peuvent être brut (obtenues par moulage, forgeage, laminage, ...etc.) comme elles peuvent être semi-finis par usinage antérieures. La *surface*

engendrée après passage de l'outil est la surface prescrite par le dessin de définition, générée par le processus d'enlèvement de matière. Les deux surfaces sont reliées par une surface intermédiaire générée pendant l'usinage par l'arête de l'outil, cette dernière est appelée *surface coupée*. [8]

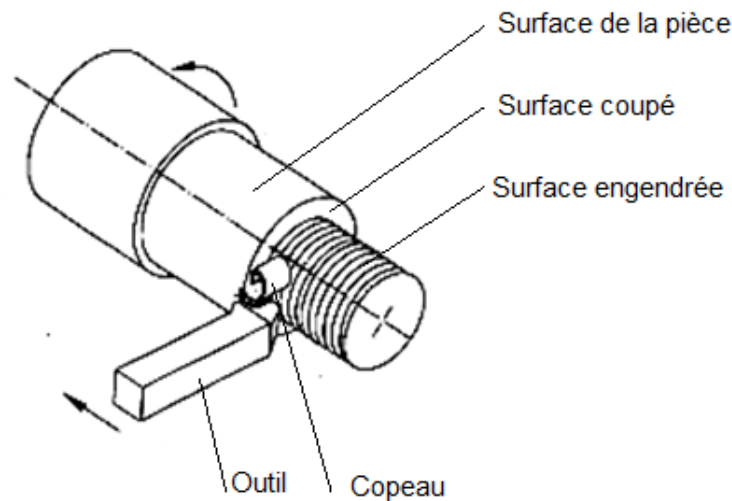


Figure.II.9. Pièce et ses surfaces [7]

OPERATIONS D'USINAGE ET SES FACIES

En industrie les ateliers de fabrication mécanique sont dotés d'un parc de machines outil qui est à la disposition du bureau d'études et méthode, afin de planifier les modes opératoires pour l'obtention de pièces finies. Chaque machine-outil est prédestinée pour des opérations d'usinages bien définies où on observe des faciès propres à chaque opération.

En tournage

Sur un tour on dispose de deux classes d'outils :

- Outils intérieurs ;
- Outils extérieurs.

La figure II.10 représente les différentes opérations d'usinage pouvant être exécutées sur les tours.

- | | | |
|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 1 . Outil à saigner | 6 . Outil à fileter (extérieur) | 10 . Outil à dresser les faces |
| 2 . Outil à charioter droit | 7 . Outil à charioter coudé | 11 . Outil à chambrer |
| 3 . Outil à retoucher | 8 . Outil couteau | 12 . Outil à aléser |
| 4 . Outil pelle | 9 . Outil à dresser d'angle | 13 . Outil à fileter (intérieur) |
| 5 . Outil à retoucher | | 14 . Outil à aléser et dresser |

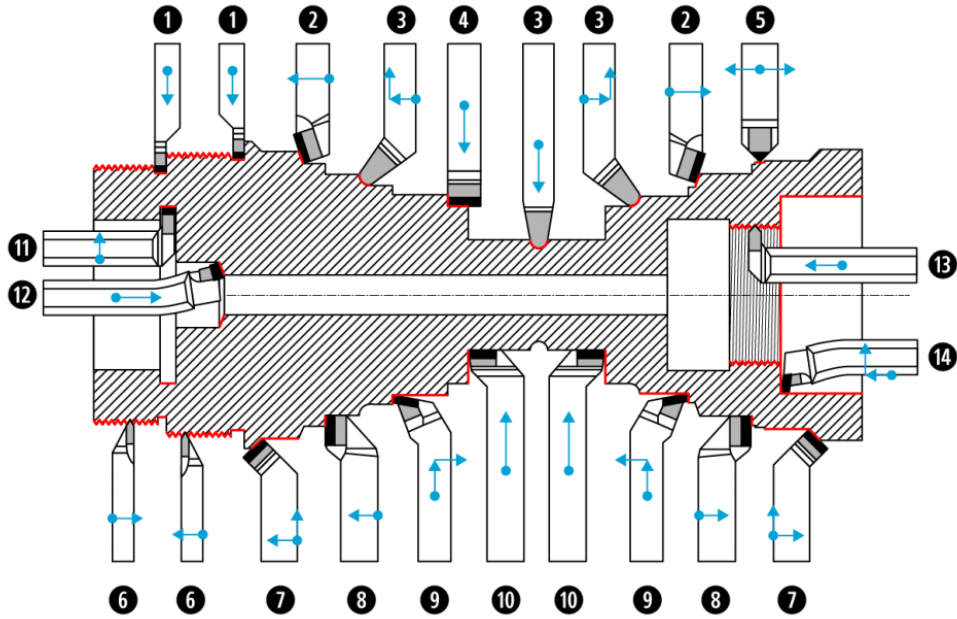


Figure.II.10. Opérations d'usinages en tournage [6]

En fraissage

les diverses opérations d'usinage qui peuvent être exécutées sur une fraiseuse sont représentées dans la figure II.11.

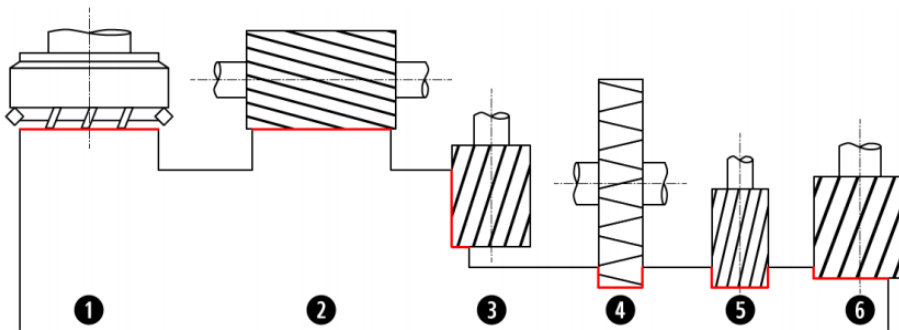


Figure.II.11. Opérations d'usinages en tournage [6]

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

NATURE DES MATERIAUX DES OUTILS DE COUPE

L'usinage des métaux ou des polymères nécessite l'utilisation de matériaux coupants ayant d'excellentes propriétés, une bonne dureté à haute température vue les frottements permanent outil / pièce et outil/copeau, de résistance à l'usure et de stabilité chimique.

Les premiers outils étaient en acier rapide où le corps et la partie active d'outil étaient en une seule barre, quand l'outil est usé, on l'affûtait. La venue de nouvelles technologies et de

nouveaux matériaux, le barreau en acier rapide ne remplit pas les exigences technologiques voulues. C'est l'apparition des outils en carbures métalliques, les céramiques, les CBN et le diamant qui a rendu possible l'exploitation industrielle de ces techniques. Les principales matières utilisées pour les outils de coupes modernes sont représentés dans la figure II.12.

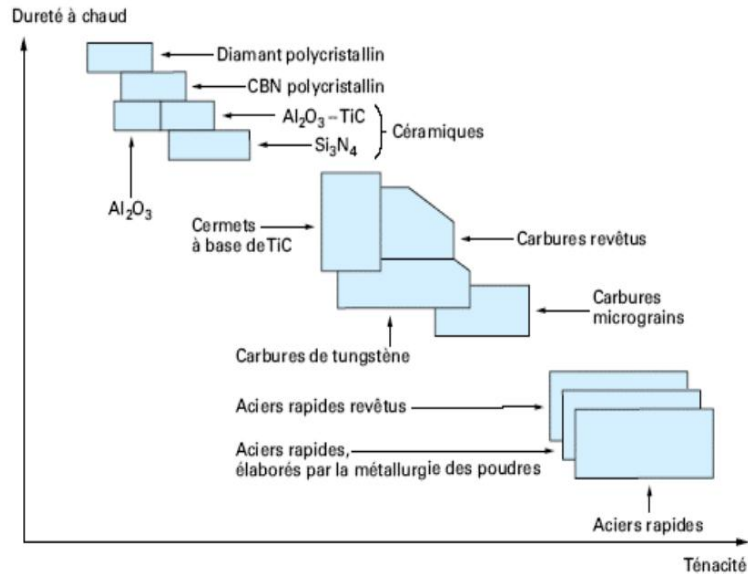


Figure.II.12. Disposition les matériaux d'outil selon la ténacité et la dureté. [10,11]

Des conditions optimales d'usinage sont à rechercher pour un outil et une pièce donnés. Cette recherche ne peut être établie que par un protocole expérimental très rigoureux. La figure II.13 présente les nuances d'outils coupants et leurs domaines d'application.

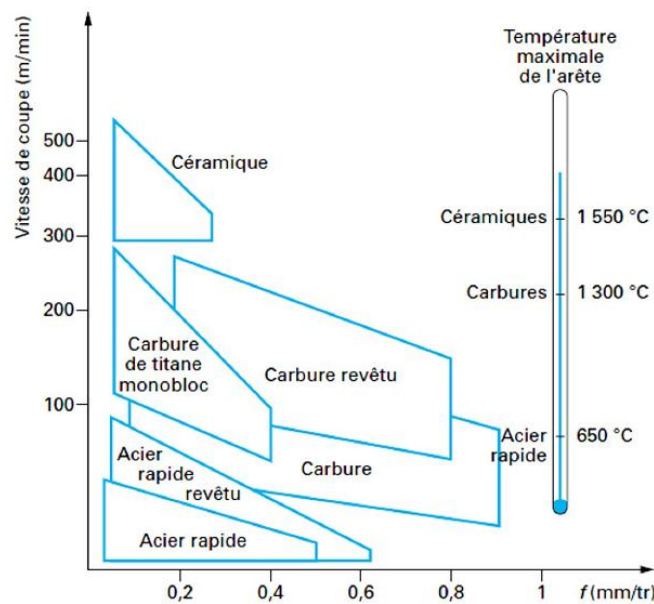


Figure.II.13. Matériaux à outil de coupe en fonction de paramètres de coupe [12]

Aciers rapides

La base des outils AR (acier rapide) ou ARS (aciers rapides supérieurs) est un acier faiblement allié qui a subi un traitement thermique, plusieurs outils en RAS sont disponibles, on les distingue par leur composition métallurgique, en général ils ont une teneur en carbone de 0,7 à 1,6 %, en Tungstène de 12 à 20 %, en molybdène de 3,5 à 10 % et des traces de vanadium et Cobalt pour avoir plus de duretés.

L'usinage par les outils en ARS s'effectue à faible vitesse de coupe pour éviter l'échauffement trop important et aussi éviter que l'outil de perdre ses caractéristiques (la trempe dispersée), une usure rapide de l'arête soit observée.

Remarque II.3

les vitesses de coupe pour ce type varie entre 25 et 35 m/mn pour les aciers. Leur dureté varie entre 60 et 70 HRC, et sera maintenue jusqu'à 550 °C. (Figure II.13)

Actuellement, ce matériau est utilisé seulement pour certains outils comme les forêts ou les outils à faible angle tranchants.

Carbures métalliques

Les principaux composants des outils en carbures métalliques sont le carbure de tungstène (phase α), et le carbure de titane, de tantale ou le niobium (phase γ) et d'un élément de liaison entre les grains de carbure (taille de 0.2 à 1 μm) généralement du cobalt (phase β) de l'ordre de 8 à 20%. [13]

L'ajout du carbure de titane de tantale ou de niobium permet d'augmenter les propriétés à haute température (jusqu'à 1000°C) en réduisant le frottement, donc un choix de vitesses de coupe très importantes allant jusqu'à 100 m/min, Cet élément procure aussi à l'outil une durée de vie supérieure à celle des outils en AR ou ARS. La dureté des outils en carbure est de l'ordre de 80 à 90 HRC.

Aujourd'hui, ces outils sont de plus en plus utilisés, comme plaquettes brasées (fixation permanente) ou plaquettes amovibles par fixation mécanique (fixation non permanente), cette dernière permet l'utilisation de plaquettes à plusieurs faces de coupe.

Carbures revêtus

Les carbures métalliques frittés (*obtenus par frittage*) non revêtus présente beaucoup d'avantages mais l'inconvénient majeur est sa faible ténacité. Ces propriétés sont inversement proportionnelles aux quantités de ses composants. Afin de remédier à ce problème, les outils à plaquettes en carbures revêtus ont été mis en œuvre où ils ont appliqué un matériau de revêtement, dont les plus utilisés sont :

- Nitrure de titane TiN
- Oxyde d'aluminium Al₂ O₃

- Carbure de titane TiC
- Carbonitride de titane TiCN
- Alumino-nitrate de titane TiAlN.

Chaque élément de revêtement apporte à l'outil une aptitude meilleure dans un domaine particulier. Il est possible d'appliquer plusieurs couches de différents matériaux de revêtement pour combiner leurs différents avantages. [14]

Céramiques

Les outils en céramique sont généralement des plaquettes frittées d'alumine Al_2O_3 ou de Nitrure de silicium Si_3N_4 dits plaquettes Sialon ou d'oxyde de chrome Cr_2O_3 . Ils possèdent de bonnes caractéristiques thermomécaniques, ils sont favorables à l'usinage en coupe continue, mais à éviter dans le cas de coupe discontinue où l'outil présente des défauts d'ébréchure du bord des plaquettes et un craquage thermique car des outils fragiles.

Ces outils acceptent un usinage à une vitesse de coupe de 500 m/min pour les aciers, et gardent ses caractéristiques jusqu'à des températures de 1200°C, donnant un excellent état de surface des pièces usinées.[15]

Cermets

Les outils Cermets sont en carbures, en nitrures, en carbonitride ou en borure avec un liant de grains un métal ou un alliage ferreux (cobalt, nickel, nickel - fer, nickel – chrome, etc.). ils ont par rapport aux métaux durs conventionnels une densité faible avec une dureté et une résistance à l'usure plus élevées. Leurs duretés sont de l'ordre de 1500 à 2000 HV. Ils ne perdent pas leur capacité à chaud en usinage à grande vitesse ou aux températures extrêmes allant jusqu'à 1000°C. [15]

Les cermets sont destinés pour les opérations de finition et l'usinage de précision qui sollicitent un travail à grandes vitesses de coupe et à faibles avances.

Nitride de bore cubique NBC

CBN est un matériau très dur prévu pour l'usinage des aciers trempés, des fontes et d'alliages à base de nickel ou cobalt. Il n'oxyde pas à haute température contrairement au diamant. Pour travailler avec ce matériau, il faut être très rigoureux au niveau des conditions de coupe (machine stable, grande rigidité et un arrosage permanent durant l'usinage). Les plaquettes en nitride de bore sont destinées principalement à la finition des pièces de précisions.

Damant

Le diamant est fortement utilisé comme composant des meules en abrasif, ou des grains sertis ou brasés sur un corps pour les outils tranchant à arête unique réservée à des travaux de finition et de réaffûtage de meules, il est instable à haute température, à 650°C il se

transforme en graphite. Il convient parfaitement à usinage des alliages d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissables...etc. [16]

Référence

- [1] BELLOUFI, Cours procédés de fabrication – Master / Maintenance industrielle , Université Kasdi MERBAH Ouargla – Algérie, 2010.
- [2] P. DEPEYRE, Fabrication mécanique, Licence de Technologie et Mécanique, Faculté des Sciences et Technologies, Université de la Réunion – France, 2005.
- [3] M. HABAK, Etude de l'influence de la microstructure et des Paramètres de coupe sur le comportement en Tournage dur de l'acier a roulement 100Cr6, Thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure d' Arts et Métiers / Paris 6 – France, 2006.
- [4] Formation Professionnelle en Afrique: Technologie Générale pour Construction Métallique - Tome 3, 2012.
- [5] R. MOHAMMAD, Etude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec. Mise en place de critères d'aide à la décision du changement de plaquette. Application au cas de l'ébauche de turbines de pompage, thèse doctorat de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier – Toulouse – France, 2011.
- [6] GRUESCU, F. DEFOURNE, P. QUAEGBEUR et J. F. ANTOINE, Préparation de production en productique mécanique - étude de fabrication et analyse d'usinage (3PM-EFAU), SEMM (service enseignement et multimédia) / université lille1 – France, 2015.
- [7] J.STUTO et R. VAN HULLE, Usinage, Université de Liège – Belgique, 2017.
- [8] J.VERGNAS, Usinage Technologie et Pratique, Génie Mécanique, Dunod. 1982.
- [9] V. SONGMENE, Techniques avancées de mise en forme: Usinage I /SYS-849, Institut de technologie supérieur, Université du Québec – Canada, 2008.
- [10] A. BERRO, Optimisation multi-objectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique, thèse de doctorat université Toulouse, décembre 2001.
- [11] PASSERONCE, Tournage, technique d'ingénieur ,2007.
- [12] A. MOUFKI, A. DEVILLEZ, D. DUDZINSKI, and A. MOLINARI. Thermomecaical modeling of cutting and experimental validation. In Kluwer Academic Publishers, editor, Metal Cutting and High Speed Machining, pages pp. 51–67, 2002.
- [13] J. L. BATTAGLIA, H. ELMOUSSAMI et L. PUIGSEGUR, Modélisation du comportement thermique d'un outil de fraisage : approche par identification de système non entier, C. R. Mécanique Vol. 330 (2002), 857-864.
- [14] P. POLLET, Usinabilité en fraisage d'un acier 42CrMo4 traité calcium, mémoire de PFE, (2000), ENSAM de Metz.
- [15] A. SEBHI, Etude tribologique des outils de coupe et aciers, thèse de doctorat de l'Université Ferhat Abbès – Sétif – Algérie, 2013.
- [16] S. BENZAADA, Coupe des métaux, Université Mohamed Khider – Biskra –Algérie.

CHAPITRE. III. Analyse de la formation du copeau

CARACTERISATION DE LA COUPE DES METAUX

La caractérisation de la coupe est basée sur l'observation du phénomène, l'établissement de modèles et par la suite la vérification expérimentale, cette procédure a été suivie par la plupart des chercheurs du domaine. *Tresca* en 1878 a noté que, pour un outil à géométrie constante, une profondeur de passe insuffisante provoque des déformations plastiques importantes, contrairement à des passes plus épaisses. À l'époque, ses observations ont permis aux artisans le développement de machines plus rigides et plus puissantes. Par la suite, *Mallock* en 1881 a établi que le copeau est le résultat du cisaillement du matériau à usiner, où les déformations dépendent du frottement entre la face de coupe de l'outil et le copeau (figure 2.1 b). *Taylor* (1907) a aussi émis des théories qui restent jusqu'à aujourd'hui une base pour estimer la durée de vie d'un outil de coupe. [1]

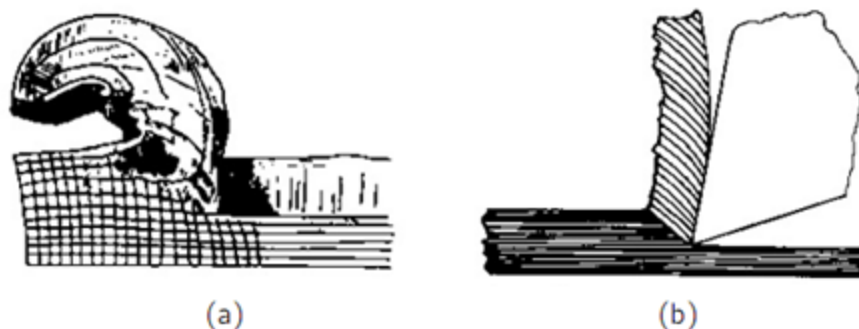


Figure.III.1. Observations de la coupe des métaux (d'après Tresca et Mallock).[1]

Définitions :

La coupe est l'interaction entre l'outil et la pièce à usiner, il en résulte de se contactent des résidus (déchets) appelés copeaux.

Au contact de l'outil en mouvement et la pièce brute où semi-finie, commence l'écoulement du copeau.

PHENOMENES PHYSIQUES EN USINAGE

Les effets physiques observés en usinage sont classés en quatre catégories : mécaniques, thermiques, chimiques et tribologiques.

Les quatre phénomènes physiques sont dépendants l'un de l'autre et interfèrent par leurs effets. La puissance et la robustesse de la machine, le montage et le mode de fixation des pièces, et même les aptitudes des opérateurs sur la machine, affectent également les résultats d'usinage. Tout en agissant sur ces paramètres, afin de donner de bonnes conditions de travail à l'outil, ce dernier se détériore et devient défaillant.

L'opération d'usinage est observée par la production de copeaux donnant lieu à des processus physiques qui sont à l'origine des :

- Modifications cristallines ;
- Déformations élastiques, plastiques puis rupture de matière à usiner.

Le contact entre l'outil et la pièce donne aussi un frottement importé causant ainsi :

- Un dégagement de chaleur ;
- Des microsoudures ;
- La formation d'arête rapportée sur la face de coupe de l'outil.

L'analyse et le traitement correct des conditions de coupe, de la forme de la partie active de l'outil, de la nuance et d'autres facteurs permettent aux opérateurs d'atteindre un processus de coupe productive et rentable.

FORMATION DU COPEAU

La surépaisseur de matière à enlever c'est la couche qui va former le copeau sous l'action mécanique complexe d'un outil de coupe, en utilisant une machine-outil comme le tour, la fraiseuse, la perceuse ou la scie ...etc. l'analyse et la compréhension du processus de formation du copeau est nécessaire pour l'amélioration et le développement des machines-outils et les moyens de coupe.

L'accumulation de matière devant l'outil (étape 2) génère des forces très importantes d'action de l'outil et de réaction de la part de la pièce, jusqu'à qu'il a détachement de matière de la pièce (étape 3) par déformation élastique, plastique puis rupture.(Figure III.2)

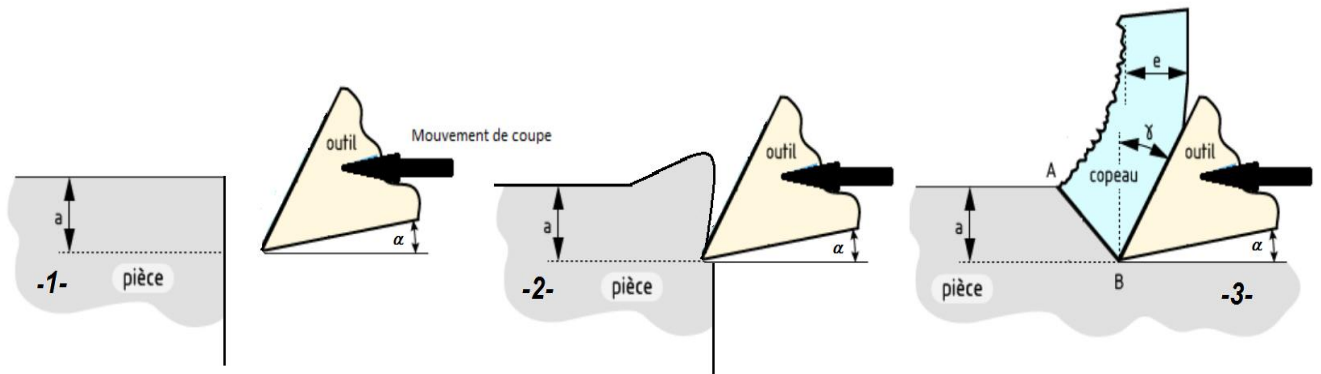


Figure.III.2. Etapes de formation de copeau [cours-et-exercices.com]

La majorité des études en **coupe orthogonale** ont établi que le copeau est formé de lamelles de matière orientées suivant une direction bien définie. Le copeau se détache de bloc de la pièce par l'effet de cisaillement entre deux lamelles avoisinantes aux bords de l'outil (B). le plan de cisaillement des lamelles de copeau est orienté suivant la droite AB. Une fois la coupe amorcée le processus se répète avec avance de l'outil sur la pièce, le copeau en se détachant glisse sur la face de coupe de l'outil où il sera dégagé. La trainée de l'outil face à la face de dépouille génère la surface usinée.

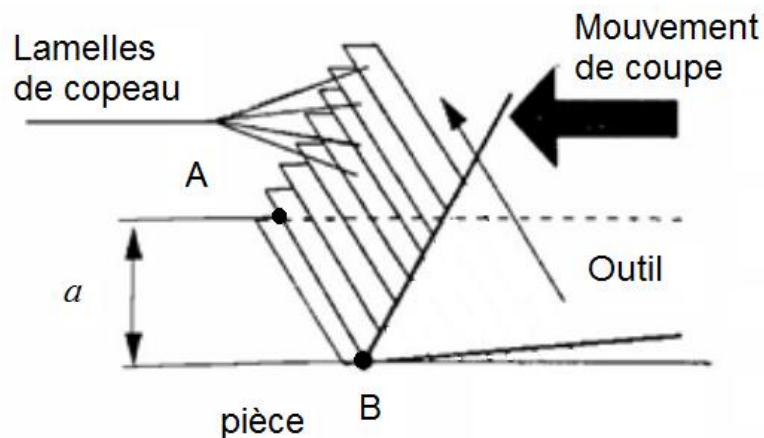


Figure.III.3. Formation de copeau - analogie du paquet de cartes [cours-et-exercices.com]

À l'échelle microscopique ou d'un grain monocristallin le glissement de lamelles de copeau est réellement un glissement entre particules isolées d'un grain ou même au sein du grain poly- cristallin. Le déplacement des grains s'accompagne nécessairement d'un échauffement important et suivi d'une modification des propriétés mécaniques de la surface générée par la coupe qui devient plus dure et plus fragile par rapport au cœur de la pièce. (Figure II.4 et II.5)

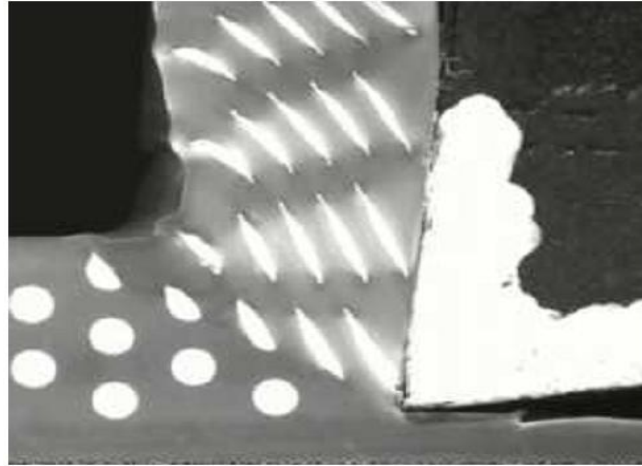


Figure.III.4. Déplacement et déformation des grain monocristallin en coupe orthogonale.

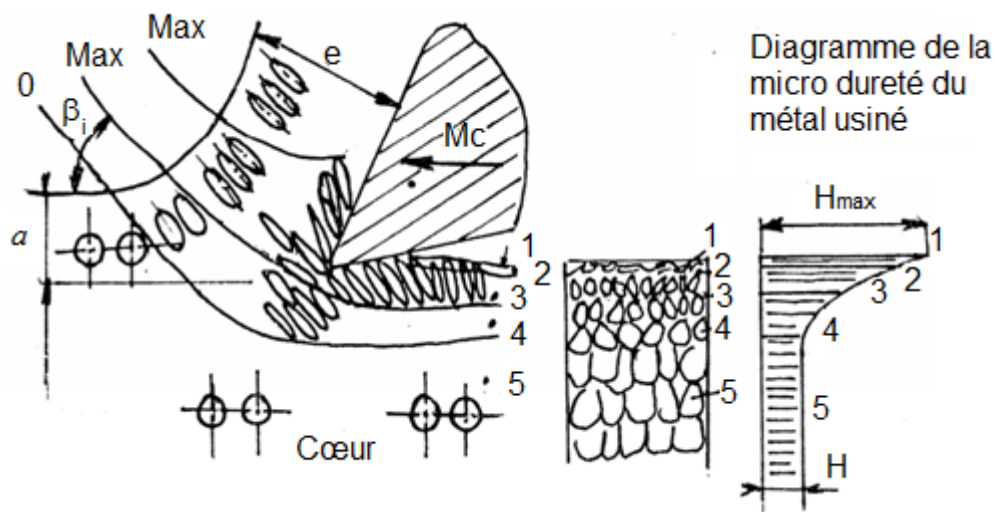


Figure.III.5. Formation de copeau à l'échelle cristalline.[5]

ZONES D'ELABORATION DU COPEAU

À l'échelle mésoscopique, l'étude de la formation de copeau et l'interférence entre la pièce/outil coupant sont faites à un plan plus large que l'échelle microscopique. Plusieurs études ont montré qu'au voisinage de l'espace arête copeau pièce est caractérisé par l'apparition de zones de sollicitation très remarquables. Ces zones sont localisés par le principe de l'interaction mécanique des matériaux (Analyse thermomécanique) et le processus de coupe (Analyse tribologique). En coupe orthogonale quatre zones sont mises en évidence. (Figure III.6)

1. Zone morte ou zone de séparation du métal ou aussi zone de forte pression hydrostatique
2. Zone de cisaillement primaire;
3. Zone de cisaillement secondaire ou zone de frottement intense;
4. Zone de dépouille principale ou zone de cisaillement tertiaire.

Zone 1 : zone de séparation du métal en deux fractions par l'arête de coupe au point (O). Cette section de l'outil est une zone confinée en un point embryonnaire de sortie de copeau sous de fortes pressions hydrostatiques et aussi c'est elle qui est le point générateur de la surface usinée. Vu les efforts de compression importants, il en résulte des élévations de température qui avoisine les 600°C (Figure III.7). [7]

Zone 2 : zone de formation du copeau où on observe un changement brutal d'orientation et de vitesse d'écoulement de la matière, de la direction de la vitesse de coupe VC au sens d'écoulement du copeau, en provoquant un glissement plastique limité par l'espace (LEHQ) et un important flux de chaleur transmis à l'outil. [6]

Zone 3 : zone de glissement à l'interface copeau face de coupe, il a été constaté dans des études expérimentales et numériques, qu'un phénomène d'adhésion freine considérablement l'écoulement de la matière causant un cisaillement plastique de la matière. Le frottement copeau / face de coupe est assez intense qu'il génère une chaleur d'environ les 750°C (Figure III.7), ajoutant celle de la zone de cisaillement primaire, elle peut atteindre la température de fusion du matériau usiné. [10]

Zone 4 : cette zone est localisée à l'interface face de dépouille / surface usinée, où un frottement de glissement est observé, donnant naissance à des phénomènes d'adhésion conduisant à un cisaillement plastique de faible intensité par rapport à la zone 3. Une forte pression sur la surface usinée est accompagnée d'un état de surface et une rugosité médiocre. [6,7]

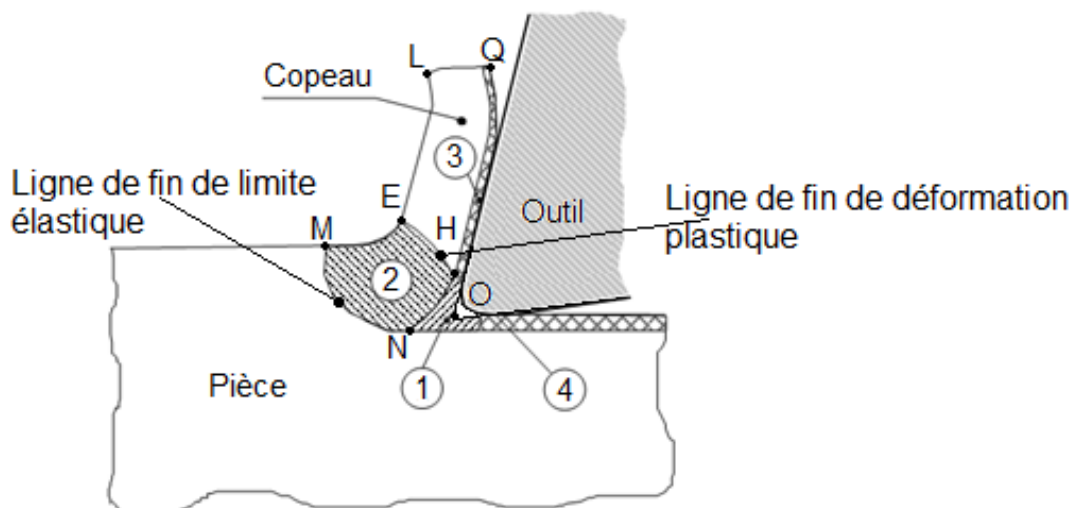


Figure.III.6. Observation des zones en coupe orthogonale [6,7]

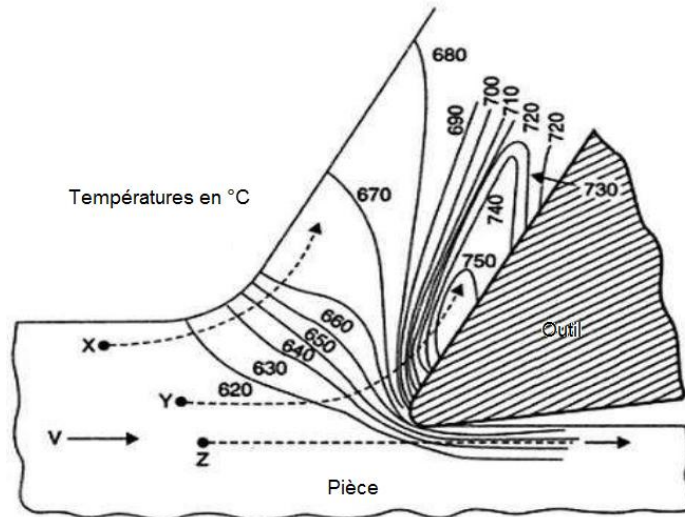


Figure.III.7. Distribution des températures en coupe orthogonale [11]

FORMES DU COPEAU EN USINAGE

La complexité du mécanisme de formation de copeau, ne nous permet pas de maîtriser complètement les résultats de la coupe en matière de forme et de nature du copeau obtenus. Les copeaux peuvent être classifiés en deux types distincts : *continu*, *discontinu*. [9,12]

1. Les copeaux continus avec ou sans bande : formés dans un état de déformation plastique stationnaire en cisaillement adiabatique. (Figure III.8)
2. Les copeaux discontinus avec ou sans segmentation : formés dans un état de déformation plastique non stationnaire. La segmentation des copeaux est pilotée par les phases de fissuration et de rupture du matériau à usiné. (Figure III.9)

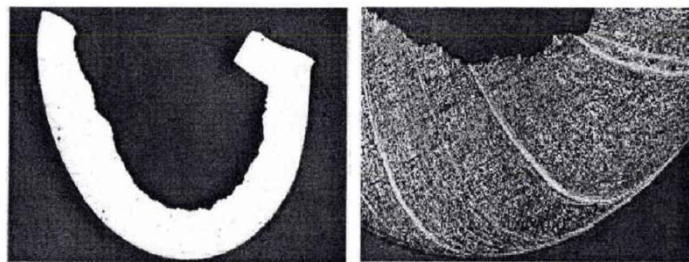


Figure.III.8. Copeau continu à surface lisse sans bande de cisaillement et copeau continu à surface lisse avec bande de cisaillement (d'après Heim 96, Sutter 97 et Faure 98).[12]

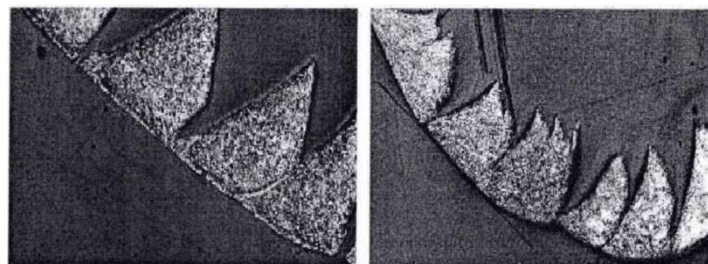


Figure.III.9. Copeau segmenté régulier et copeau segmenté irrégulier (d'après Heim 96, Sutter 97 et Faure 98).[12]

Il existe aussi d'autres copeaux intermédiaires entre un copeau continu et un copeau discontinu et d'autres géométries. (Figure III.10)

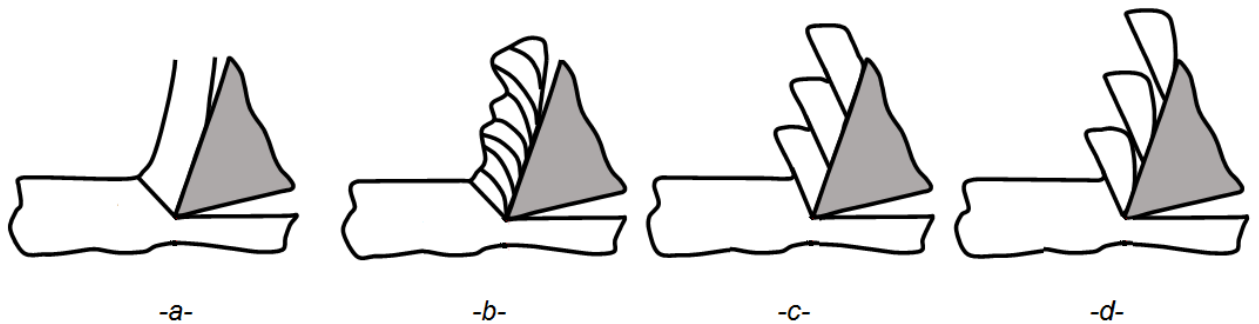


Figure.III.10. Formes de copeau en coupe orthogonale : a) copeau continu, b) copeau ondulé, c) copeau segmenté, d) copeau fragmenté (d'après Wagner 12). [4]

Des travaux de recherche ont établi que plusieurs paramètres entrent en jeu dans la formation du copeau. Ils dépendent de la matière de la pièce à usiner, des paramètres de coupe et de la forme de l'outil.

Coupeaux continus

Le copeau continu n'est formé que par un processus de déformation plastique par cisaillement au niveau de la zone primaire, sans écoulement continu le long de la face de coupe de l'outil, du fait que la valeur de la contrainte de cisaillement ne dépasse pas le point de rupture du métal. le copeau continu se manifeste en coupe des métaux ductile est à faible profondeur de passe à et vitesse de coupe V_c (Figure III.11) (d'après Heim 96 et Faure 93). [12]

Coupeaux discontinus

Un phénomène d'instabilité dans la zone de cisaillement primaire conduit à la rupture du matériau qui donne un aspect discontinu aux copeaux. Un mode de rupture fragile peut être observé pour la coupe des matériaux durs et un autre mode de rupture du type ductile est constaté pour des matériaux moins durs mais à des vitesses de coupe plus importantes. (Figure III.11) (d'après Heim 96 et Faure 93). [12]

Une norme a été établis pour classifier les copeaux obtenus en usinage, tableau III.1 (NFE 66 505).

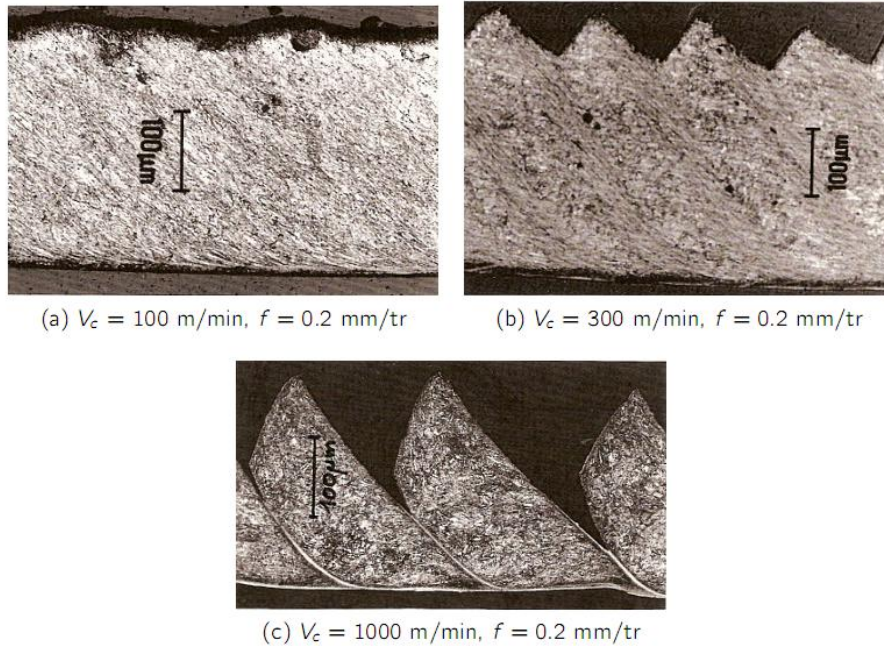


Figure.III.11. Copeaux obtenus à différentes vitesses de coupe (a) continu, (b) faiblement discontinu et (c) fortement discontinu (d'après Le Calvez 95).[1]


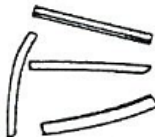






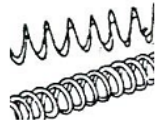






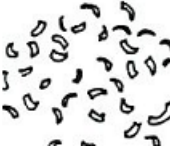


Remarque III.1

- Les professionnels en coupe des métaux conseillent à un usinage produisant un copeau court qui se fragmente facilement, qui est très avantageux par son:
 - ✓ Evacuation facile du copeau,
 - ✓ Pièce non rayée,
 - ✓ Meilleur état de surface,
 - ✓ Refroidissement de l'outil plus efficace,
 - ✓ Sécurité.
- Des diagrammes brise-copeaux sont à la disposition des professionnels pour contrôler la formation de copeau en donnant un choix des conditions de coupe profondeur de passe et avance en fonction des attributions de l'outil et la matière à usiné.

et il faut éviter :

- Un copeau long et filant qui entraîne une réduction de durée de vie de l'outil, provoqué par un échauffement excessif, un écaillage, une arête rapportée, une rupture de l'arête.
- Un copeau très fragmenté favorise l'apparition de vibrations de la pièce avec état de surface rugueux. [2]

Tableau III.1 Classification des copeaux selon la norme NFE 66505[8]

Types de copeaux	Formes		
1 : Copeau ruban	11 : Long 	12 : Court 	13 : Enchevêtré 
2 : Copeau tubulaire	21 : Long 	22 : Court 	23 : Enchevêtré 
3 : Copeau spirale	31 : Plat 	32 : Conique 	
4 : Copeau hélicoïdal en rondelle	41 : Long 	42 : Court 	43 : Enchevêtré 
5 : Copeau hélicoïdal conique	51 : Long 	52 : Court 	53 : Enchevêtré 
6 : Copeau élémentaire	61 : Enchevêtré 	62 : Détaché 	
7 : Copeau aiguille			
8 : Copeau en arc			

Références

- [1] D. GERMAIN, Développement d'un modèle d'efforts de coupe intégrant le contact en dépouille : application au tournage de super finition du cuivre Cu-c2. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, ParisTech, 2011. France, 2011.
- [2] C. GRUESCU, F. DEFOURNE, P. QUAEGEBEUR et J. F. ANTOINE, Préparation de production en productique mécanique - étude de fabrication et analyse d'usinage (3PM-EFAU), SEMM (Service Enseignement et Multimédia) / Université Lille1 – France, 2015.
- [3] John Wiley & Sons, Fundamentals of Modern Manufacturing, 2nd edition Inc. M. P. Groover, 2002.
- [4] Usinage par outil coupant , GN-3-PROFA, INSA Institute des sciences appliquées – Lyon – France, 2017.
- [5] S. BENZAADA, Coupe des métaux, Université Mohamed Khider – Biskra –Algérie.
- [6] F. DARGNAT, Modélisation semi-analytique par approche énergétique du procédé de perçage de matériaux monolithiques, Thèse de Doctorat en Mécanique, Université Bordeaux 1, France, 2006.
- [7] M. CHERIF, Modélisation générique des efforts de coupe en fraisage pour la CFAO et la surveillance de l'usinage, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, France, 2003.
- [8] P. DEPEYRE, Fabrication mécanique, Licence de Technologie et Mécanique, Faculté des Sciences et Technologies, Université de la Réunion – France, 2005.
- [9] R. MOHAMMAD, Etude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec. Mise en place de critères d'aide à la décision du changement de plaquette. Application au cas de l'ébauche de turbines de pompage, thèse doctorat de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier – Toulouse – France, 2011.
- [10] M HABA K : Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage de l'acier a roulement 100Cr6. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2006.
- [11] R. RAJENDRAN, Theory of metal Cutting / Thermal aspects of Machining, Tool materials, Tool wear Cutting fluids and Machinability, Federal institute of science and technology – Kerala – Inde
- [12] M. NOUARI, Modélisation de l'usure par diffusion des outils de coupe en usinage à grande vitesse, Thèse de Doctorat de l'Université de Metz – France, 2000.
- [13] M. FONTAINE, Modélisation thermomécanique du fraisage de forme et validation expérimentale, Thèse de Doctorat de l'Université de Metz – France, 2004.

CHAPITRE. IV. Endommagement et usure des outils:

Les pressions accumulées, plus des élévations de la température localisées dans les zones de formation de copeau sont la source de phénomènes physico-chimiques très complexes. Ces derniers agissent sur l'outil et provoquent sa dégradation rapide, réduisant ainsi le temps de son état de service. Cet acte d'usure de l'outil est perceptible quand les conditions sont réunies, des déformations et températures élevées, ajouté aux sèvres constraints thermomécaniques. La ruine de l'outil est soutenues par différents types d'usure et sous l'effet de différents mécanismes.

DEFINITION DE L'USURE

L'usure est une fatalité pour l'outil, il ne peut pas en échapper tant que le couple outil / pièce est en contact et en mouvement, il en résulte souvent une perte de matière par l'outil, donc il faut savoir, quand il faut s'arrêter pour changer d'outil ou d'arête. La figure IV.1 représente l'évolution de l'usure en fonction du temps de travail de l'outil, on distingue trois (03) zones de fonctionnements qui peuvent été identifiées comme suite :

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

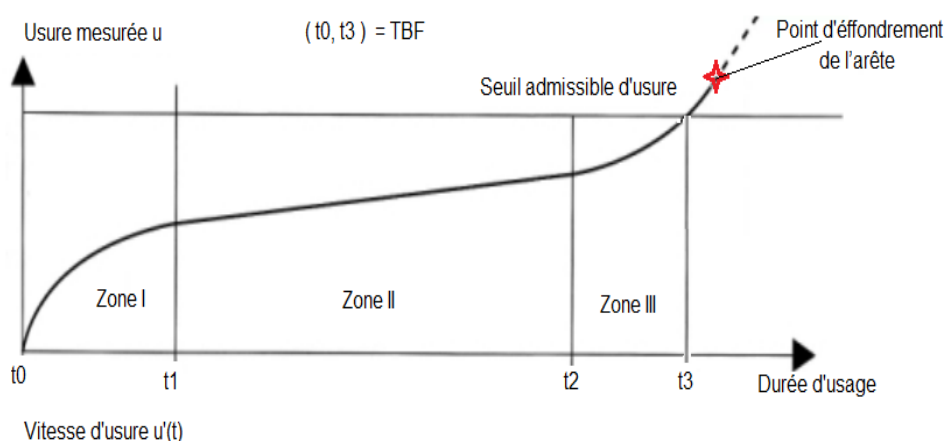


Figure.IV.1. Evolution de l'usure dans le temps

MODES D'USURE EN USINAGE

Différents modes d'usure peuvent être observés et selon la littérature deux grandes familles sont à mentionner :

1. Usures par effets mécaniques,
2. Usures par effets physico-chimiques.

La première catégorie regroupe quatre types d'usures. [1]

Usure par abrasion

Les impuretés et les inclusions (alumine, nitrure, carbure, oxyde) dans matériau usiné plus dure que l'outil, en plus des micros copeaux durcis au contact de l'outil favorisent son usure par abrasion.

Usure par adhésion

Cette usure se manifeste par la création de microsoudures sous de fortes pressions entre l'outil et les surfaces rugueuses du copeau. Il y a arrachement mécanique de particules soit du copeau vers l'outil ou de l'outil vers le copeau, ce qui fait apparaître respectivement une arête rapportée ou une usure sur l'outil.

Usure par fissuration

Les conditions extrêmes que l'outil éprouve durant le processus d'usinage en terme contrainte thermique et mécanique peuvent créer des fissurations au sein de l'outil et le conduire à sa ruine.

Usure par déformation plastique de l'outil

L'association des fortes pressions et des hautes températures à l'interface (outil/copeau) sera traduite par un abaissement (déformation) plastique du bec de l'outil.

La seconde catégorie se produit par réactions chimiques et/ou effet tribologique, elle regroupe essentiellement deux types d'usures :

Usure par diffusion

À des hautes températures la structure change par effet migrations de ses constituants chimiques de l'outil vers le copeau ou de la matière usinée vers l'outil. Ce transfert d'éléments chimiques se fait de façon continue (Figure IV.2).

Usure par corrosion

La vapeur d'eau du liquide de coupe (lubrifiant) avec l'oxygène de l'air favorise l'oxydation de l'outil qui le fragilise. Une oxydation intramoléculaire et/ou électro-chimique des ions peut être aussi l'une des causes de l'usure corrosive.

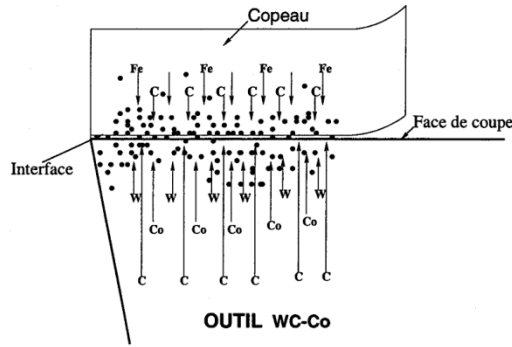


Figure.IV.2. Schéma de diffusion à l'interface copeau / outil.[8]

Les recherches faites dans le domaine ont montré que, l'évolution des différents modes d'usure est proportionnelle à la température et au régime de coupe.(figure IV.3)

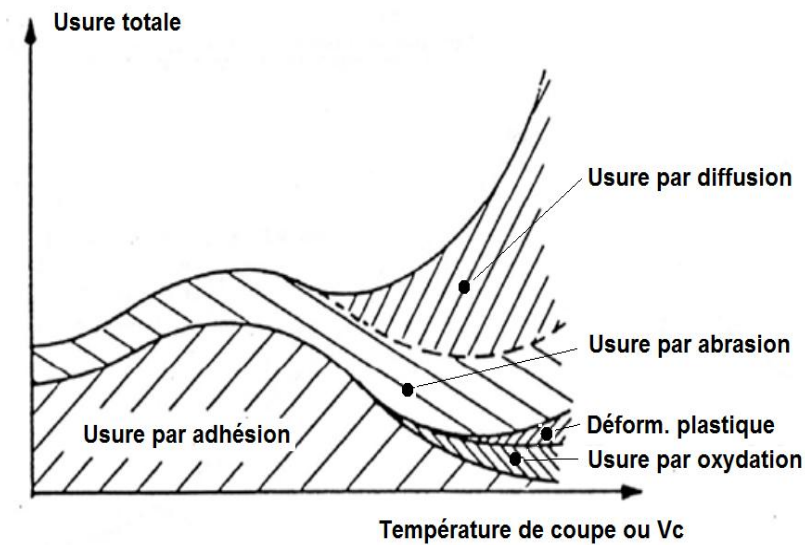
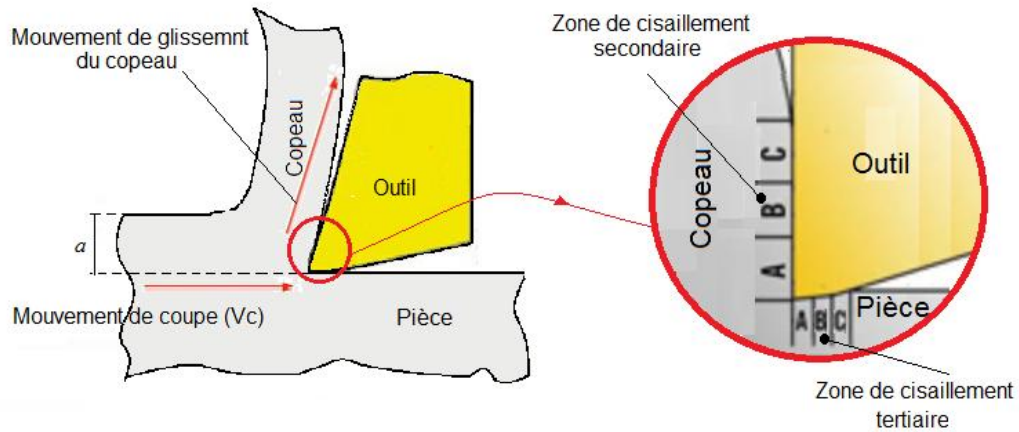


Figure.IV.3. Evolution des processus d'usure en fonction de la température (d'après Opitz, König 67)[2].

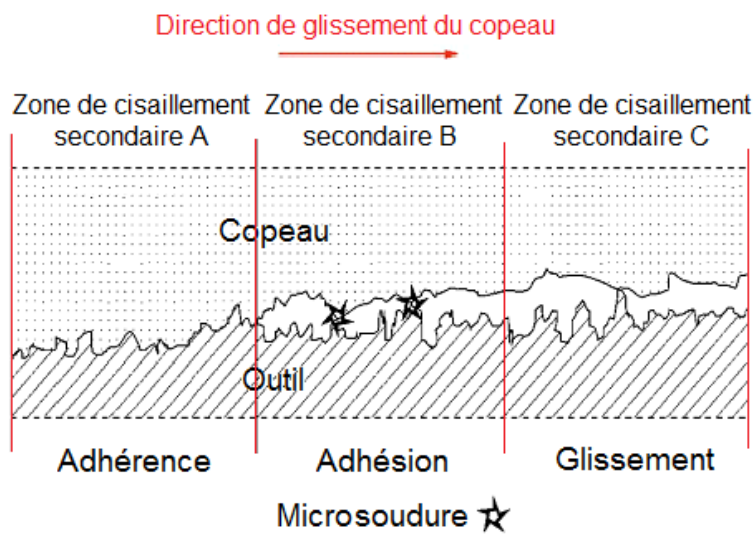
Remarque IV.1

Par l'approche tribologique, des études récentes ont constaté qu'au voisinage du bec de l'outil de coupe, dans la zone de cisaillement secondaire et tertiaire, trois (03) sous zones sont distinctes. (Figure IV.4.a)

- ✓ **Sous zone A**, la matière usinée est fortement écrasée sur l'arête de coupe causant une adhérence de la matière à l'outil.
- ✓ **Sous zone B**, la matière adhère à la face de coupe et au copeau par des microsoudures.
- ✓ **Sous zone C**, le copeau est libéré du contact de la face de coupe, il glisse sur cette dernière terminant sa course dans le bac de la machine-outil. (Figure IV.4.b)



(a)



(b)

Figure.IV.4. Différents types d'usure en coupe des métaux [industrie-mag.com]

Il s'avère que le mécanisme d'usure sur les faces de coupe et de dépouille est un cisaillement répété, provoqué par un détachement suivi d'un collage puis de nouveau un détachement du copeau de la face de coupe.[industrie-mag.com]

CRITERES D'USURE

En coupe des métaux l'outil est très sollicité par de fortes contraintes et de hautes températures conduisant ce dernier à des endommagements de toutes sortes (phénomène d'usures combinées) (figure IV.5). C'est pour cela que des critères d'usure sont mis au point. Une valeur critique d'usure est fixée pour chaque type d'usure observée sur l'outil. Le changement d'outil ou d'arête est fonction de la valeur critique de l'usure la plus dominante conduisant à la ruine de l'outil.

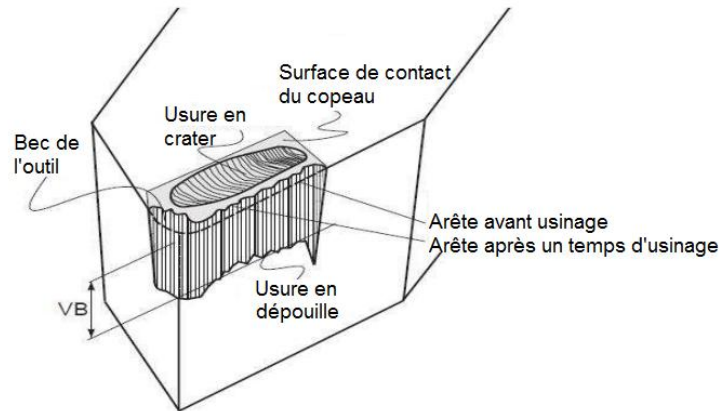


Figure.IV.5. Aspects d'usures constatés dans un outil de coupe [4]

Le tableau IV.1 regroupe les principaux résultats de recherches par investigation macroscopique des modes d'usure en donnant les causes et les corrections probables.

PARAMETRES D'USURE D'OUTIL DE COUPE

La figure IV.6 représente les formes usuelles d'usures les plus observées sur un outil de coupe. Quatre types d'usures sont caractérisés dans ce schéma par leurs paramètres d'usures respectifs :

Usure en cratère

L'usure en cratère est le résultat des frottements intenses à l'interface outil / copeau, elle est présente sous la forme de cavité (trou) sur la face de coupe de l'outil et elle est caractérisée par les constantes suivantes : (Figure IV.6)

KB : Largeur du cratère,

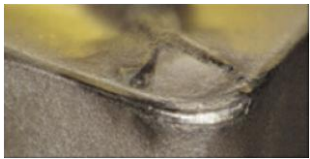








KM : Distance du centre du cratère,

KT : Profondeur du cratère. C'est par cette valeur, que le critère d'usure par cratère est définis.

Usure en dépouille

L'usure en dépouille comme son nom l'indique, elle se manifeste sur la face de dépouille sous forme de bande brillante avec des rayures (griffée) (Figure IV.6.b), elle est provoquée par le frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil, ayant pour paramètre ***VB***.

Tableau IV.1 Principaux usure observées dans un outil de coupe [mmus-carbide.com]

Formes d'usures d'outil		Causes	Corrections
Usure en dépouille		<ul style="list-style-type: none"> Nuance d'outil est trop faible. Vitesse de coupe V_c est trop élevée. Angle de dépouille est trop petit. Taux d'alimentation (vitesse d'avance) V_f est extrêmement faible. 	<ul style="list-style-type: none"> Qualité d'outil avec une résistance élevée à l'usure (plaquette avec revêtement Al_2O_3). Vitesse de coupe V_c réduite. Augmenter l'angle de dépouille. Augmenter le taux d'alimentation V_f.
Usure en cratère		<ul style="list-style-type: none"> Nuance d'outil est trop faible. Vitesse de coupe V_c est trop élevée. Taux d'alimentation V_f est trop élevé. Température trop importante 	<ul style="list-style-type: none"> Qualité d'outil avec une résistance élevée à l'usure. Vitesse de coupe V_c réduite. Taux d'alimentation réduit V_f.
Usure par ébréchure		<ul style="list-style-type: none"> Nuance d'outil est trop faible. Taux d'alimentation V_f est trop élevé. Manque de résistance des arêtes de coupe. Manque de rigidité de la tige ou du support. 	<ul style="list-style-type: none"> Outil à ténacité élevée. Taux d'alimentation V_f réduit. Augmenter la profondeur de passe pour absorber le choc. Utilisez une tige de grande taille à forte rigidité. Vitesse de coupe V_c réduite.
Fracture du bec d'outil			
Usure par déformation Plastique		<ul style="list-style-type: none"> Nuance d'outil est trop faible. Vitesse de coupe V_c est trop élevée. Profondeur de coupe et le taux d'alimentation sont trop importants. Température de coupe est élevée. 	<ul style="list-style-type: none"> Outil à haute résistance à l'usure. Vitesse de coupe V_c réduite. Diminuez la profondeur de passe et le taux d'alimentation V_f. Qualité d'outil avec haute conductivité thermique. Usinage lubrifié.
Usure par soudure ou Arête rapportée		<ul style="list-style-type: none"> Vitesse de coupe V_c est faible. Géométrie d'outil inadapté. 	<ul style="list-style-type: none"> Augmenter la vitesse de coupe V_c. Augmenter l'angle de coupe. Qualité d'outil avec une faible affinité. (grade enduit, grade cermet)
Usure par fissuration en peigne		<ul style="list-style-type: none"> Fluctuations thermique en coupe. Nuance d'outil est trop faible. Observé surtout en fraisage. Arrosage intermittent. Usinage intermittent. 	<ul style="list-style-type: none"> Coupe à sec. (pour la coupe humide, inonder la pièce avec du fluide de coupe) Qualité d'outil avec une ténacité élevée.
Usure en entaille		<ul style="list-style-type: none"> Surface dure telle que surface non coupée, pièce refroidie et couche durcie par usinage. Friction causée par des copeaux de forme irrégulière. (causée par de petites vibrations) 	<ul style="list-style-type: none"> Qualité d'outil avec une grande résistance à l'usure Augmentez l'angle de coupe pour améliorer la netteté.
Usure par écaillage		<ul style="list-style-type: none"> Arête rapportée. Mauvaise élimination du copeau. Géométrie trop fragile. Nuance d'outil est trop faible. 	<ul style="list-style-type: none"> Outil à ténacité élevée. Augmentez l'angle de coupe β Augmentez le chanfrein du bec. Réduire le taux d'alimentation V_f au début de la coupe.

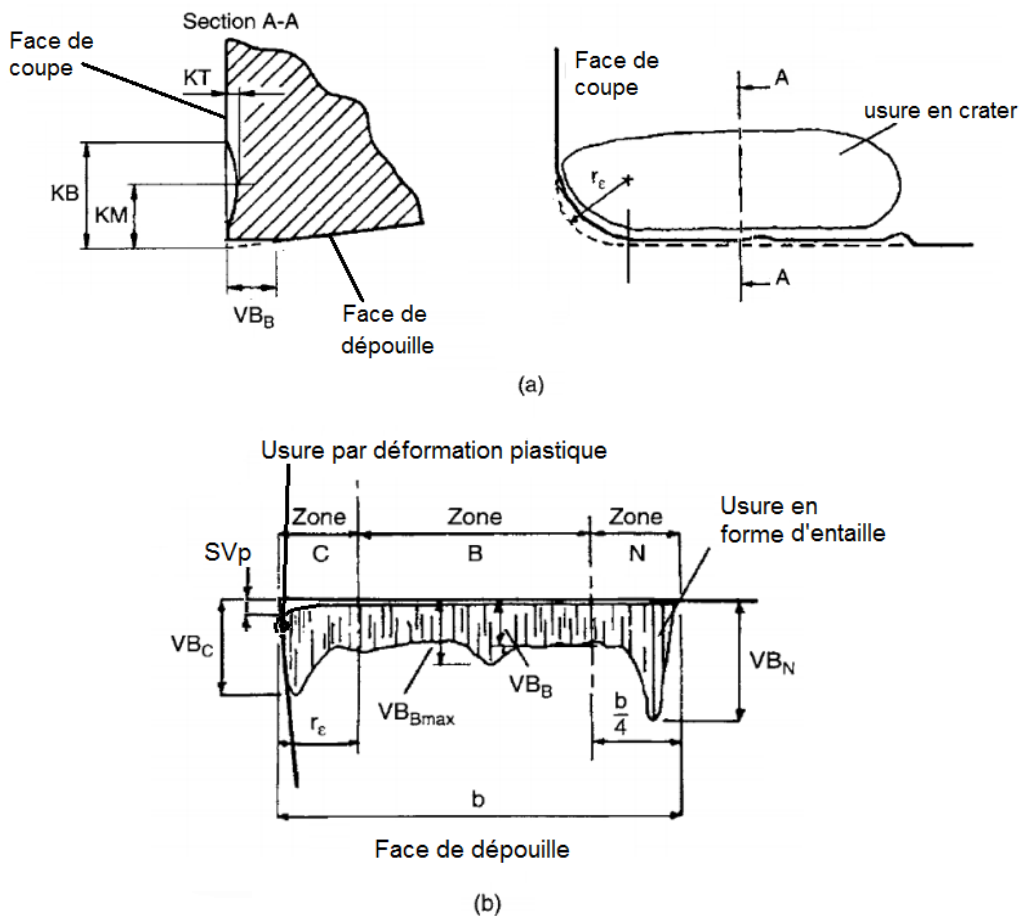


Figure IV.6. Modèles typique d'usure d'outil de coupe selon ISO 3685-1977. [3]

La largeur b de la bête correspond à la longueur de la zone de coupe de l'outil, selon la norme ISO 3685 cette dernière est divisée en trois zones (Figure IV.6.b) :

Zone C : La zone du bec de l'outil égale au rayon r_e où de l'usure par déformation plastique est localisée, caractérisée par les constantes SV_p et VB_C

Zone B : La partie centrale de la bête d'usure qui correspond à l'usure en dépouille, c'est valeur la hauteur de la bête VB_B qui fixe le critère d'usure.

Zone N : Cette partie à une longueur de $b/4$ limitant l'usure par entaille caractérisée par le paramètre VB_N .

Remarque IV.2

I La norme NF E66-505 spécifie qu'au bout d'un certain temps d'usinage, l'outil peut atteindre les valeurs limites d'usures :

- $VB_B = 0,3\text{mm}$ pour une usure en dépouille régulière,
- $VB_{Bmax} = 0,6\text{mm}$ si l'usure en dépouille est irrégulière,
- $KT = 0,06 + 0,3f$ pour une usure en cratère (f : avance en mm/tr),

- $VB_N = 2 \text{ mm}$ l'usure en forme d'entaille.

À ce moment l'outil est considéré non apte à la coupe (fin de vie de l'outil) il faut donc changer l'outil ou l'arête.

- II D'autres critères d'évaluation de l'état d'endommagement d'un outil de coupe appelé critères indirects parmi eux on peut citer: l'état de surface et les tolérances géométriques des pièces finies, les efforts et le travail spécifique de coupe et la température de la pointe de l'outil... etc.

DUREE DE COUPE D'UN OUTIL:

Par définition la durée de coupe ou de vie T d'un outil selon la norme ISO 3685 : *C'est le temps de coupe totale d'un outil nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique.*

Il est nécessaire de passer par une approche expérimentale, pour arriver à estimer le temps de service d'un outil de coupe pour des conditions de coupe bien définies, en général c'est le critère d'usure VB_B ou KT qui est pris en compte. Des mesures de VB_B sont prises au cours du temps d'usinage jusqu'à la ruine de l'outil, pour différents niveaux de vitesse de coupe.

Un tracé des données expérimentales est présenté dans la figure IV.7. les courbes donnant l'évolution de l'usure en dépouille ou en cratère en fonction du temps suivent le modèle mathématique de Koren et Lenz (Equation IV.1):[5]

$$VB_B = A.(1 - e^{-at}) + B.(e^{\beta t} - 1) \quad (IV.1)$$

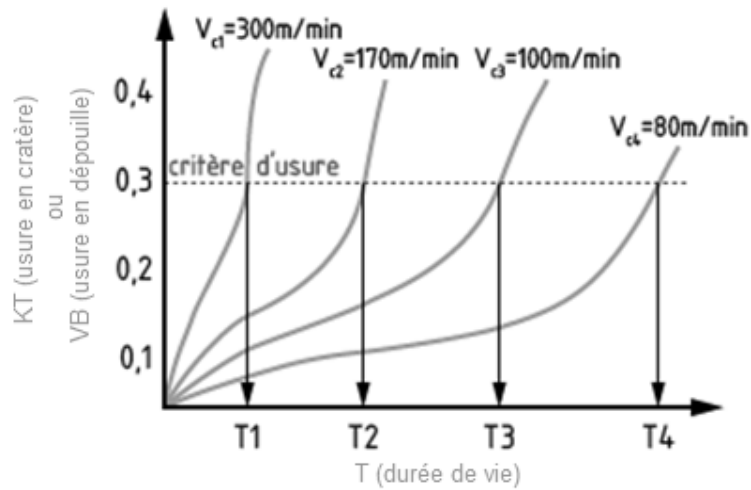
l'équation IV.1 est dite loi d'usure de l'outil, elle regroupe deux termes distincts. Le premier représente l'évolution de l'usure abrasive et le second celle de l'usure par diffusion.

Des derniers résultats de la figure IV.7 et pour un critère d'usure donné, on peut tracer la courbe de la durée de vie en fonction de la vitesse de coupe. Dans la courbe $T = f(V_c)$ figure IV.8 on remarque trois zones qui la caractérise :

- **Zone AB** : zone des faibles vitesses de coupe, cette partie de la courbe est inexploitable,
- **Zone BC** : zone stationnaire, le temps est constant (usure stable),
- **zone CD** : le temps décroît (usure accélérée) en suivant une droite de pente négative en fonction de la vitesse de coupe, ce domaine est exploitable et il donc possible d'interpréter le phénomène par un modèle mathématique.

C'est en 1907 que Taylor a proposé son modèle pour estimer la durée de vie d'un outil (loi de Taylor). (Equation IV.2)

$$T = C_V V_c^n \quad (IV.2)$$



(a)

Figure.IV.7. Evolution de l'usure frontale en fonction du temps [6,7]

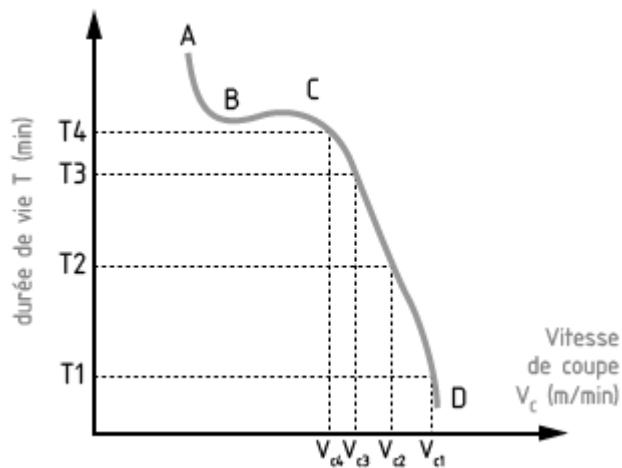


Figure.IV.8. Courbe de durée de vie en fonction de la vitesse de coupe [6]

- L'exposant n dépend : de la profondeur de passe, avance, matériau usiné et matériau constituant de l'outil et il a une valeur : $-10 < n < -1$. (Tableau IV.2)

Tableau IV.2 Valeurs moyenne de l'exposant n de la loi de Taylor.

Matériau d'outil	ARS / HSS	Carbure	Carbure revêtu	Céramique
n	-6	-4	-3	-2

- La constante C_v dépend essentiellement du matériau usiné et des conditions de coupe. Sa valeur est très variable : $10^4 < C_v < 10^{14}$.

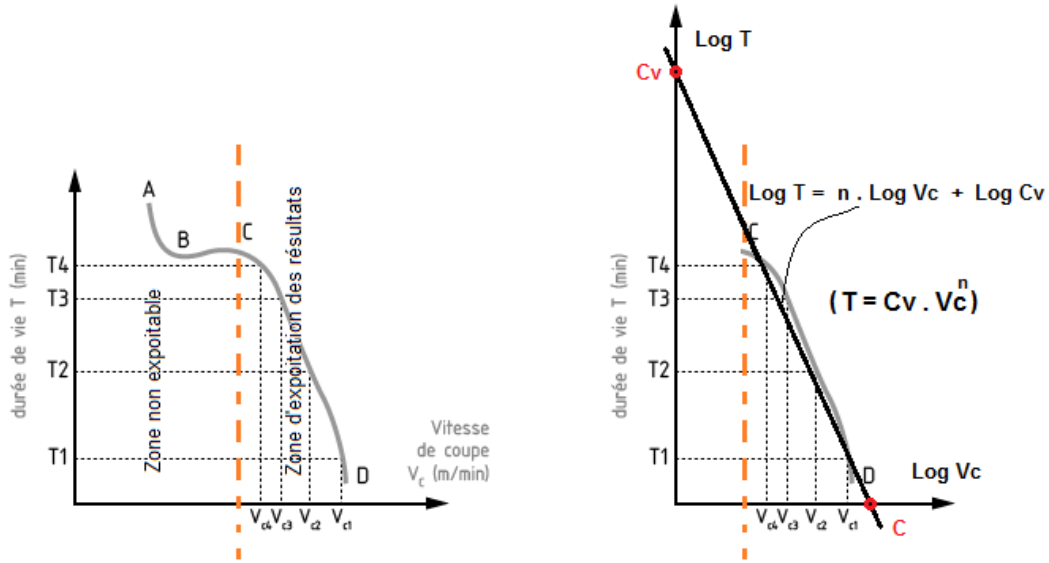


Figure.IV.9. Analyse graphique par la loi de Taylor[6]

Comme la courbe de la zone CD à une allure d'une droite (Figure IV.9), la loi de Taylor serait la plus correcte.

On déterminant les constantes C_v et n des données expérimentaux (Figure IV.9) la loi d'usure (l'équation de Taylor) sera déduite. A partir de cette loi, Il serait possible de fixé un temps de coupe et retrouver la vitesse de coupe associée.

L'équation IV.2 peut être formulée comme suite :

$$V_c = C_T \cdot T^\alpha \quad (IV.3)$$

avec $\alpha = 1/n$ et $C_T = (1/C_v)^{1/n}$

Tableau IV.3 Valeurs du coefficient α .

Matériau d'outil	Acier rapide	Carbure métallique	Céramique
α	0,1 – 0,125	0,2 – 0,3	0,4 – 0,5

D'autres modèles empiriques ont été annoncés après Taylor comme : [8]

Modèle de Gilbert ou le modèle de Taylor généralisé en 1950

$$V_c = C \cdot f^x \cdot a^y \cdot V_c^n \quad (IV.4)$$

où f est l'avance, a est la profondeur de passe et x, y, n sont .

La constante C : dépend du Couple Outil / Matière

Les coefficients x, y et n : dépendent que du matériau constituant l'outil,

avec

$$x \approx n/6 \text{ et } y \approx n/3$$

et

x, y, n sont toujours < 0 .

Modèle de Colding en 1959

$$k + A.x + B.x^2 + C.y + D.y^2 - z + E.z^2 + F.x.y + G.y.z + H.x.z \quad (IV.5)$$

avec k, A, B, C, D, E, F, G et H des constantes, $x = \ln a, y = \ln V_c$ et $z = \ln T$

Modèle de König-Depiéreux en 1969

$$T = \exp(-\alpha V_c^v - \gamma a^\mu - \sigma a^\lambda) \quad (IV.6)$$

Modèle de Kronenberg en 1970

$$T = C (V + k)^m \quad (IV.7)$$

k, C et m sont des constantes.

Remarque IV.3

- La valeur de $VB_B = 0,3 \text{ mm}$ est la limite acceptable pour les opérations d'ébauche. En usinage d'ébauche les conditions de coupe sont les plus défavorables et l'outil est le plus sollicité pendant cette période.
- Par contre en demi-finition et finition, la précision des pièces est de rigueur, il est donc judicieux de choisir une valeur inférieure à $VB_B = 0,3 \text{ mm}$.
- La plupart des travaux de fabrication dans l'industrie sont en série (petite, moyenne et grande série) où l'usure des outils affecte considérablement la productivité. Afin d'optimiser la production, il est conseillé de choisir un temps d'usure d'outil inférieur de **10 % à 20 %** du temps calculer pour une usure VB fixée par les critères de durée de vie.
- Lorsque le coefficient n est très conséquent (grand en valeur absolue), il indique que la loi de Taylor a une forte dépendance à la vitesse, cela traduit que le matériau de l'outil a une faible résistance à l'usure.
- Les valeurs usuelles du coefficient n pour des opérations en tournage, fraisage et perçage peuvent regrouper dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4 Valeurs du coefficient n selon l'opération et la matière usinée.

Outil de coupe	Opération d'usinage	Matériau de la pièce à usiner			
		Aciers	Fontes grises	Fontes malléables	Alliages d'aluminium
Acier rapide RAS	Tournage	-8,5	-10	-8,5	-2,5
	Fraisage	-5	-6,5	-5	-2
	Perçage	-5	-8,5	-8,5	-2,5
Carbure métallique	Tournage	-4,5	-5	-5	-2,5
	Fraisage	-3	-3	-3	-2
	Perçage	-3,5	-2,5	-2,5	-2,5

Exemples

Afin d'optimiser les coûts d'usinage, il est nécessaire de déterminer la loi d'usure de l'outil pour une opération effectuée dans la machine-outil. Les données expérimentales sont données dans le tableau ci-dessous (Tableau VI.5).

- Déterminer la loi d'usure (**loi de Taylor**) pour cette opération d'usinage.

Tableau IV.5 Valeurs expérimentales de l'usure d'un outil de coupe après un temps d'usinage.

Vc1 [450 m/min]		Vc2 [300 m/min]		Vc3 [250 m/min]		Vc4 [200 m/min]		Vc5 [150 m/min]		Vc6 [100 m/min]	
Temps [min]	VBB [mm]	Temps [min]	VBB [mm]	Temps [min]	VBB [mm]	Temps [min]	VBB [mm]	Temps [min]	VBB [mm]	Temps [min]	VBB [mm]
1,43	0,13	1,49	0,08	3,05	0,09	2,97	0,08	2,97	0,05	3,02	0,04
2,35	0,20	2,97	0,12	4,48	0,12	6,00	0,12	5,21	0,08	5,97	0,07
3,10	0,25	4,74	0,16	6,07	0,15	8,86	0,15	7,33	0,09	9,02	0,09
4,12	0,32	6,00	0,19	7,82	0,18	11,65	0,18	9,78	0,11	11,97	0,11
5,47	0,39	7,53	0,24	9,02	0,20	14,21	0,20	11,99	0,12	14,99	0,13
		8,92	0,28	11,08	0,22	15,98	0,24	15,12	0,14	18,95	0,16
		10,61	0,33	12,75	0,26	18,93	0,28	18,95	0,18		
		11,97	0,37	15,07	0,3						
				17,65	0,35						
				19,86	0,40						

Réponse

1. Les données du tableau IV.5 sont représentés graphiquement dans la figure VI.10 :

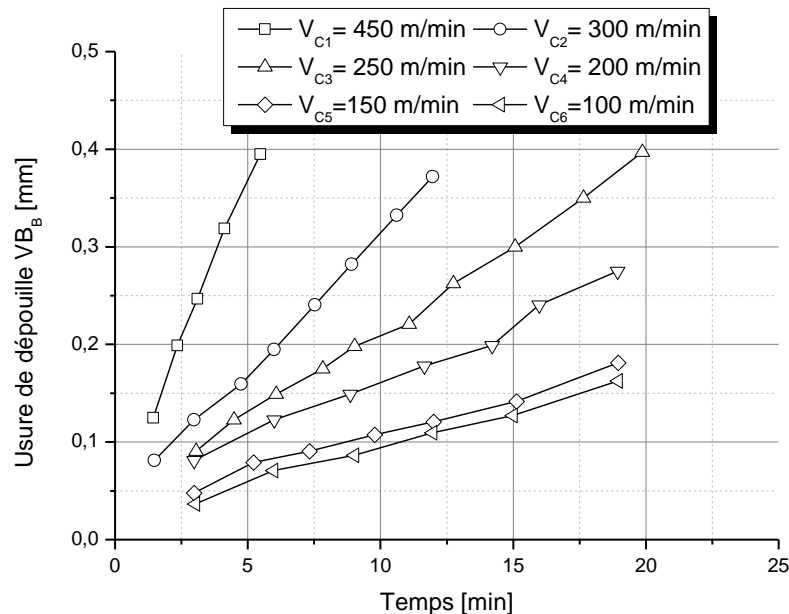


Figure.IV.10. Graphe de l'usure de dépouille VB_B en fonction de temps pour différentes vitesses de coupes V_c .

A partir de la figure IV.10, on peut déterminer le temps d'usure ultime pour chaque régime de coupe V_c , à un critère d'usure de dépouille qu'on prend généralement $VB_B = 0,3$ mm. (Figure IV.11)

La droite qui représente $VB_B = 0,3$ mm = Cst a des points d'intersection avec les courbes $VB_{B1}(T)$, $VB_{B2}(T)$, $VB_{B3}(T)$ et $VB_{B4}(T)$ qui correspondent respectivement aux vitesses V_{C1} , V_{C2} , V_{C3} et V_{C4} . Chaque point d'intersection a respectivement un temps d'usure T_1 , T_2 , T_3 et T_4 .

Les temps T_1 et T_2 sont déterminés par simple interpolation linéaire des courbes $VB_{B1}(T)$ et $VB_{B2}(T)$, le temps T_3 est tiré directement du tableau des données expérimentales (Tableau IV.5) où $T_3 = 15,07$ min et le temps T_4 est déduit par extrapolation linéaire de la courbe $VB_{B4}(T)$. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau IV.6 en matière de temps d'usure T et vitesse de coupe V_c .

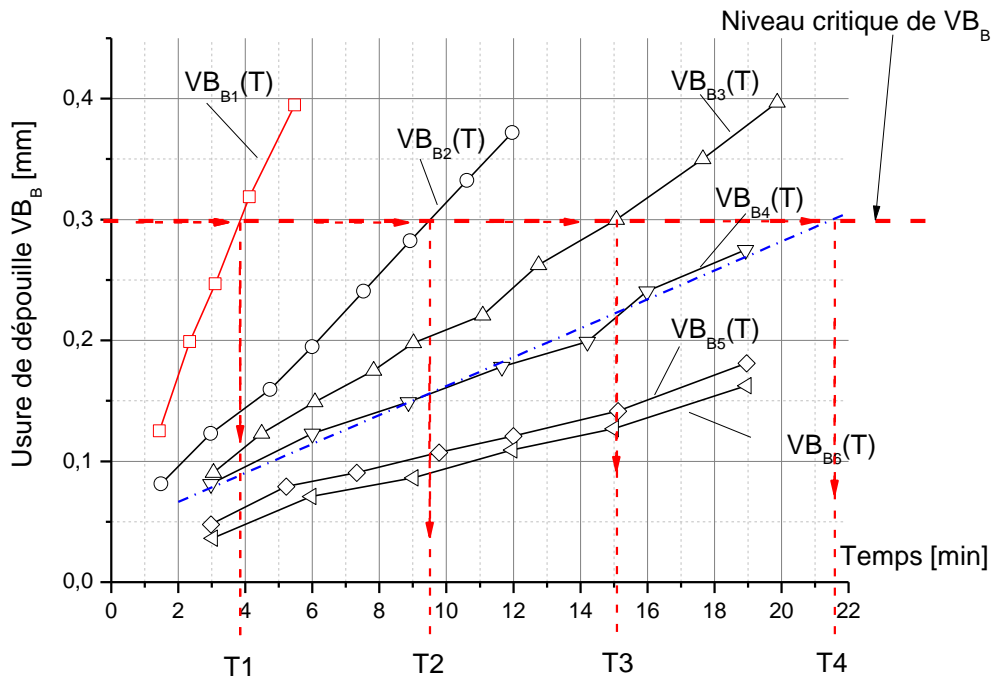


Figure IV.11. Exploitation du graphe pour déterminer les temps d'usure ultimes à $VB_B=0,3$ mm

Tableau IV.6 Temps d'usure à $VB_B=0,3$ mm pour des vitesses variables V_c

Points	V_{Ci}	T_i	$\text{Log } V_{Ci}$	$\text{Log } T_i$
1	450	3,85	2,65	0,58
2	300	9,55	2,48	0,98
3	250	15,07	2,40	1,18
4	200	21,59	2,30	1,33

Première méthode (Méthode graphique)

Résolution N° 1

Les résultats du tableau IV.6 peuvent être exploitées directement sur Excel pour tracer la courbe $T = f(V_c)$ sur des axes logarithmiques. Ensuite tracer la courbe de tendance et déduire son équation, comme le montre la figure IV.12.

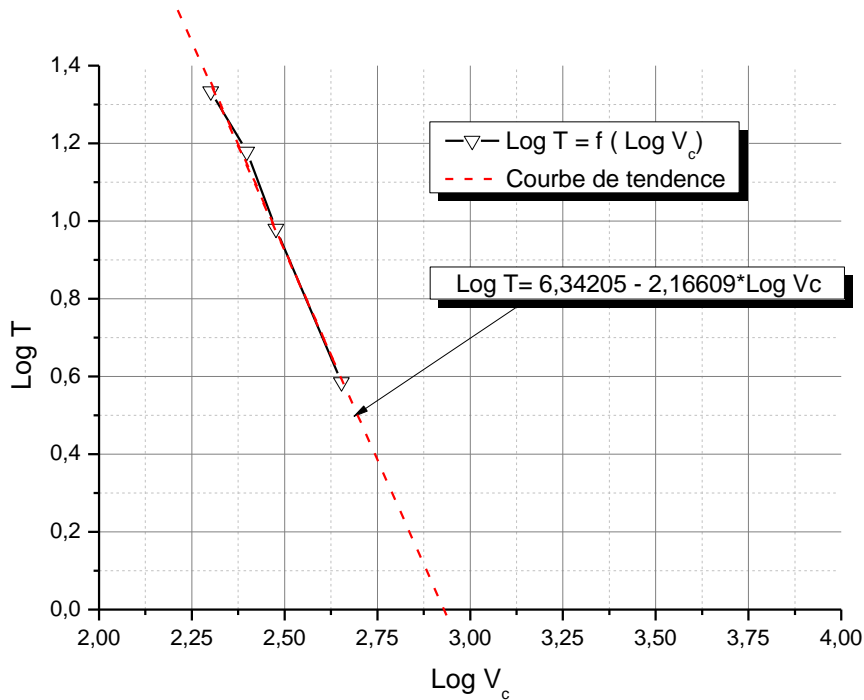


Figure.IV.12. Analyse graphique directe sur Excel

L'équation de la droite de tendance est de la forme $(y = a \cdot x + b)$. (Figure IV.12)

$$\text{Log } T = 6,34205 - 2,16609 \cdot \text{Log } V_c$$

le modèle de Taylor peut-être écrit sous la forme :

$$\text{Log } T = \text{Log } C_v - n \cdot \text{Log } V_c$$

par similitude on a :

$$\text{Log } C_v = 6,34205 \Rightarrow C_v = 10^{6,34}$$

et

$$n = -2,16$$

$$\text{on obtient alors : } T = 10^{6,34} \cdot V_c^{-2,16}$$

Résolution N° 2

La loi d'usure de Taylor est définie par :

$$T = C_v V_c^n$$

** Le but de cette résolution est de déterminer les constantes C_v et n

on reprend la même figure VI.12 et on trace une droite passant par les quatre points expérimentaux où la fonction logarithmique $\text{Log } T$ est de la forme $y = a \cdot x + b$

on obtient alors : $\text{Log } T = a \cdot \text{Log } V_c + b$

on a aussi la forme logarithmique de la loi de Taylor est :

$$\text{Log } T = \text{Log } C_v + n \text{Log } V_c$$

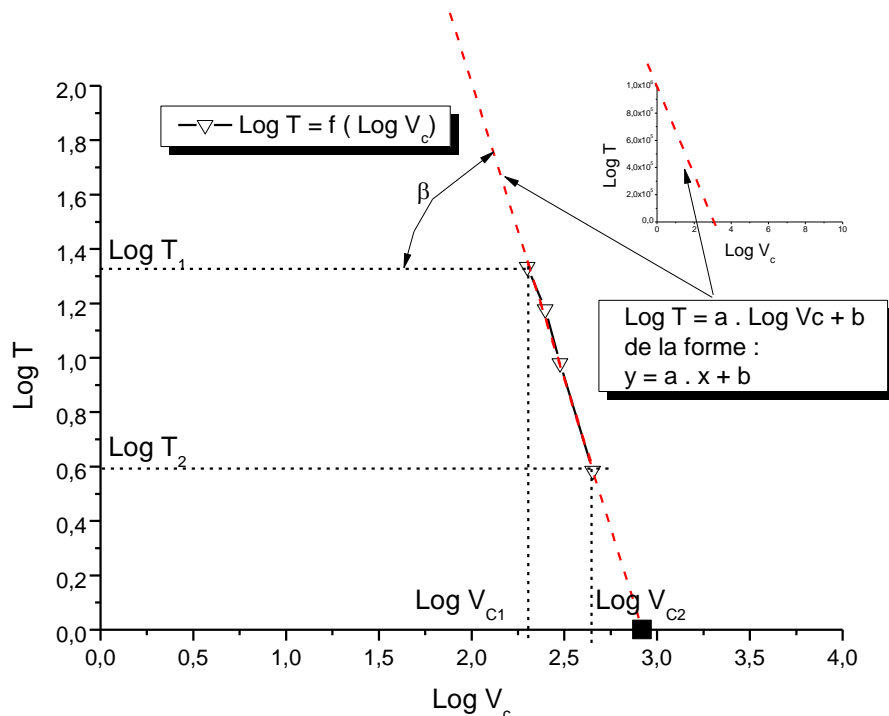


Figure.IV.13. Analyse graphique par détermination de coefficients a et b de la droite.

Où n est la pente qu'on détermine à partir de la courbe linéaire de la figure IV.13, on dispose des points suivants $(\text{Log } V_{c_1}, \text{Log } T_1)$ et $(\text{Log } V_{c_2}, \text{Log } T_2)$ par exemple $(2.30 ; 1.33)$ et $(2.65 ; 0.58)$.

La pente est donnée par :

$$a = n = \text{tg}\beta = \frac{\text{Log } T_1 - \text{Log } T_2}{\text{Log } V_{c_1} - \text{Log } V_{c_2}} = \frac{1.33 - 0.58}{2.30 - 2.65} = -2,1428$$

L'intersection avec l'axe des ordonnées (l'axe des vitesses (Ox)) donne le point $(\text{Log} V_{c_0}, 0)$
d'où :

D'une part

$$n = \text{tg}\beta = \frac{\text{Log} T_1 - \text{Log} T_0}{\text{Log} V_{c_1} - \text{Log} V_{c_0}} = \frac{1.33 - 0}{2.30 - \text{Log} V_{c_0}} = -2.1428$$

$$n = -2,1428$$

après calcul

$$\text{Log} V_{c_0} = 2.30 + \frac{1.33}{2.1428} = 2.9206$$

d'autre part,

$$0 = \text{Log} C_v + n \text{Log} V_{c_0}$$

d'où

$$\text{Log} C_v = -n \text{Log} V_{c_0} = 2.1428 \times 2.9206 = 6.2582$$

et

$$C_v = 10^{6.26}$$

et enfin l'équation de Taylor devient : $T = 10^{6.26} \cdot V_c^{-2,14}$

Remarque IV.4

- On peut obtenir cette valeur de même en utilisant le point d'intersection de la courbe linéaire avec l'axe des abscisses (l'axe de temps (Oy));
- La différence entre les résultats la première et la deuxième résolution est due essentiellement à l'erreur de troncature.

Deuxième méthode

Sans passé par le graphe, en utilisant le Tableau IV.6, on peut déduire la formule de Taylor $T = C_v V_c^n$ ou la forme logarithmique linéaire est : $\text{Log} T = \text{Log} C_v + n \text{Log} V_c$

Prenant deux points du tableau

$$\begin{cases} T_1 = 21.59 \text{ min} \\ V_{c_1} = 200 \text{ m/min} \end{cases} \text{ et } \begin{cases} T_2 = 3.85 \text{ min} \\ V_{c_2} = 450 \text{ m/min} \end{cases}$$

En remplaçant dans l'équation (2)

$$\begin{cases} \text{Log} T_1 = \text{Log} C_v + n \text{Log} V_{c_1} \\ \text{Log} T_2 = \text{Log} C_v + n \text{Log} V_{c_2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{Log } 21.59 = \text{Log } C_v + n \text{Log } 200 \\ \text{Log } 3.85 = \text{Log } C_v + n \text{Log } 450 \end{cases}$$

après résolution du système on obtient

$$n = \frac{\text{Log } 21.59 - \text{Log } 3.85}{\text{Log } 200 - \text{Log } 450} = -2.1428$$

$$n = -2.1428$$

et

$$\text{Log } C_v = \text{Log } 21.59 + 2.1428 \cdot \text{Log } 200 = 6.2586$$

et

$$C_v = 10^{6.26}$$

et enfin l'équation de Taylor est : $T = 10^{6.26} \cdot V_c^{-2.14}$

Référence

- [1] R. MOHAMMAD, Etude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec. Mise en place de critères d'aide à la décision du changement de plaquette. Application au cas de l'ébauche de turbines de pompage, thèse doctorat de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier – Toulouse – France, 2011.
- [2] H.BEN ABDELALI, Caractérisation et modélisation des mécanismes tribologiques aux interfaces outils-pièces-copeaux en usinage à sec de l'acier C45, Ecole Centrale de Lyon – France, 2013.
- [3] L. CERCE, F. PUSAVEC, J. KOPAC, Spatial cutting tool wear evaluation, journal of production engineering, N° 2, Vol 15, 2012.
- [4] R. RAJENDRAN, Theory of metal Cutting / Thermal aspects of Machining, Tool materials, Tool wear Cutting fluids and Machinability, Federal institute of science and technology – Kerala – India.
- [5] P. BOURDET, Coupe des métaux, Ecole normale supérieure de Cachan – France – 2004.
- [6] C. GRUESCU, F. DEFOURNE, P. QUAEGERBEUR et J. F. ANTOINE, Préparation de production en productique mécanique - étude de fabrication et analyse d'usinage (3PM-EFAU), SEMM (Service Enseignement et Multimédia) / Université Lille1 – France, 2015.
- [7] A. BIERLA, Usinage des aciers prétraités à l'huile entière - effets physico-chimiques des additifs soufrés. Thèse de doctorat de l'école des Arts et Métiers ParisTech – France – 2009.
- [8] M. NOUARI, Modélisation de l'usure par diffusion des outils de coupe en usinage à grande vitesse, Thèse de Doctorat de l'Université de Metz – France, 2000.