

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Abderrahmane Mira de Béjaïa**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Mécanique**

**Polycopié de cours**

---

**Coupe des Métaux 1**

*en*

*Fabrication Mécanique et Productique*

---

**Dr. BELAMRI Abdelatif**

**-2025-**

## PREFACE

Par, le présent polycopié, nous avons essayé de donner les notions de base sur le procédé de fabrication par enlèvement de matière dit **Usinage**.

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 ce domaine, les étudiants auront en premier lieu des définitions générales sur les mécanismes de formation de la matière coupée dite **copeau**, par la suite des détails sur l'outil tranchant son matériau et sa conception (forme géométrique), la notion de choix des conditions de coupe et les conséquences d'un mauvais choix lors de l'usinage d'une pièce mécanique.

Ce polycopié vient aussi comme appui de la formation académique pour le chercheur débutant dans l'étude des phénomènes de coupes des métaux et les modélisations faites par différents chercheurs de renommée mondiale dans ce domaine.

## Sommaire

### Sommaire

INTRODUCTION.....	1
<b>Chapitre 1 : Analyse de la formation du copeau .....</b>	<b>2</b>
1.1 Caractérisation de la coupe des métaux.....	2
1.2 Paramétrage de la coupe .....	3
1.3 La formation du copeau .....	4
1.4 Mécanisme de formation du copeau.....	7
1.5 Zones d'élaboration du copeau .....	9
1.6 Formes du copeau en usinage.....	11
1.7 Classification de la forme géométrique des copeaux .....	12
1.8 Configurations d'usinage .....	15
1.8.1 Coupe orthogonale.....	15
1.8.1 Coupe oblique.....	16
1.9 La notion de copeau minimum.....	16
1.10 Les critères de choix des conditions de coupe .....	17
<i>Chapitre 2 .....</i>	<i>18</i>
Conception des outils de coupe (géométrie et matériau).....	18
2.1 Introduction .....	18
2.2 Forme géométrique des outils de coupe .....	18
2.3 Influence sur la coupe et définition des principaux angles .....	20
2.4 Opérations d'usinage et ses faciès .....	22
2.5 Matériaux des outils de coupe.....	23
2.5.1 Les aciers rapides supérieur "ARS" .....	25
2.5.2 Les outils en carbures métalliques.....	25
2.5.3 Les cermets.....	26
2.5.4 Les céramiques .....	27

2.5.5 Les nitrures cubique de bore CBN .....	28
2.5.6 Les diamants.....	28
2.6 Codification ISO des plaquettes d'usinage.....	29
2.6.1 Codification ISO des plaquettes de tournage .....	29
2.6.2 Codification ISO des plaquettes de fraisage .....	31
Chapitre 3 Usure des outils de coupe .....	33
3.1 Définition de l'usure .....	33
3.2 Modes d'usure en usinage.....	34
3.3 Critères d'usure .....	36
3.4 Paramètres d'usure d'outil de coupe .....	37
3.5 Durée de coupe d'un outil.....	42
3.6 Modèle de Gilbert ou le modèle de Taylor généralisé en 1950 .....	45
Chapitre 4.....	55
Actions mécaniques de la coupe (puissances et forces de coupe) .....	55
4.1 Efforts et puissance de coupe.....	55
4.2 Cisaillement primaire et lignes de glissement.....	56
Chapitre 5 : Choix des conditions de coupe .....	59
5.1 Les quatre principale variables à prendre en considération .....	59
5.1.1 Influence de la vitesse de coupe $V_c$ .....	59
5.1.2 Influence de l'angle d'inclinaison $\gamma_s$ .....	59
5.1.3 Influence de la profondeur de passe $a_p$ .....	60
5.1.4 Influence de l'avance $f$ .....	60
5.2 Influence des paramètres de coupe sur l'usure.....	61
5.2.1 Méthodes de mesure des endommagements .....	61
5.2.2 Méthodes d'examen et d'analyse de la surface des outils et des pièces usinées .....	62
5.2.3 Méthodes de mesure des efforts et des puissances de coupe .....	63
5.3 Influence des composantes de l'effort de coupe .....	64

5.3.1 Influence des propriétés mécaniques de la matière à usiner .....	64
5.3.2 Influence de la géométrie de l'outil .....	65
5.3.3 Influence du liquide de lubrification et de refroidissement .....	65
5.4 Lois d'usure d'outil mesuré par des essais d'usinabilité .....	66
5.5 Choix des conditions de coupe en tournage (ISO 3685) .....	67
5.6 Notions du couple outil/matière .....	67
5.7 Conditions d'utilisation d'un outil.....	68
Chapitre 6.....	70
Modélisation analytique et numérique de la coupe .....	70
6.1 Introduction .....	70
6.2 Mécanismes physiques régissant la formation du copeau .....	71
6.3 Evolution des modélisations .....	72
6.5 Modèle de Merchant (1945).....	73
6.6 Modèle d'Oxley.....	75
6.6.1 Présentation du modèle .....	75
6.6.2 Points forts de la modélisation d'Oxley.....	76
6.6.3 Points faibles de la modélisation d'Oxley.....	77
6.7 Modélisation numérique de la coupe orthogonale.....	77
6.7.1 Introduction .....	77
6.7.2 Modèle de formulation.....	78
6.7.3 Le maillage .....	80
6.7.4 Modèle de comportement de la pièce à usiné .....	81
6.8 Logiciel commercial .....	82
Bibliographie.....	85

## INTRODUCTION

Le domaine de la fabrication mécanique par enlèvement de matière reste aujourd'hui un des piliers du développement industriel d'un pays, le défi n'est pas seulement d'usiner la pièce mécanique mais aussi de satisfaire un rapport qualité prix très concurrentiel.

L'usinage d'un métal doit être le moins couteux possible utilisant le minimum d'investissement en termes d'outillage et de machine utilisés. Le métal et la forme de la pièce étant préalablement choisis durant la conception de la pièce (condition de résistance des matériaux "**RDM**"), reste à l'ingénieur de trouver l'art et la manière d'usiner cette pièce tout en gardant à l'esprit qu'il y a des limites et exigences économiques à prendre en considération.

La discipline "**Coupe des métaux**" vient comme science des études des phénomènes de coupe et de formation du copeau (le copeau est la matière coupée), ceci commence de l'arrachement du copeau jusqu'au calcul des forces de coupe et de la puissance machine nécessaire.

Depuis la révolution industrielle du 19<sup>ième</sup> siècle, les chercheurs commencent à s'y intéresser aux phénomènes liés à 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 nouveaux 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 de là améliorer le rendement et la productivité. Ce document est structuré en quatre chapitres présentés comme suit :

***Le chapitre 1*** Analyse de la formation du copeau ;

***Le chapitre 2*** Conception des outils de coupe (géométrie et matériau) ;

***Le chapitre 3*** Usure des outils de coupe ;

***Le chapitre 4*** Actions mécaniques de la coupe (puissances et forces de coupe) ;

***Le chapitre 5*** Choix des conditions de coupe ;

***Le chapitre 6*** Modélisation analytique et numérique de la coupe ;

## **Chapitre 1**

### **Analyse de la formation du copeau**

## Chapitre 1 Analyse de la formation du copeau

En construction mécanique toute opération de mise en forme par enlèvement de matière et qui est destinée à conférer à une pièce des dimensions et un état de surface situés dans une fourchette de tolérance donnée s'appelle usinage (Dietrich, 2004)

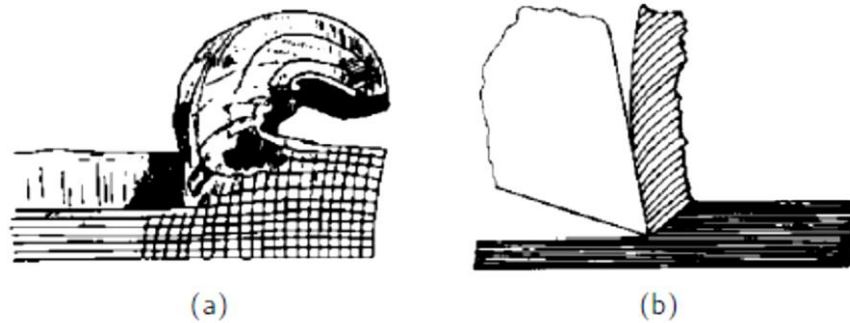
### 1.1 Caractérisation de la coupe des métaux

Les premiers écrits traitant de la caractérisation de la coupe de métaux figurent dans les travaux de Tresca (Tresca, 1878) concernant le choix de la géométrie de l'outil et de la profondeur de passe (figure 1.1a). Le choix de ces paramètres devant être basé sur l'observation de la déformation générée dans le copeau, Tresca remarqua, pour une géométrie d'outil constante, qu'une profondeur de passe insuffisante produisait plus de déformation plastique qu'une profondeur de passe importante. Cette observation ouvrit la voie du développement de machines plus rigides et plus puissantes. Trois années plus tard, Mallock, (Mallock, 1881) décrivit la formation du copeau comme le résultat du cisaillement de la matière, dont la déformation est influencée par le frottement entre la face de coupe de l'outil et le copeau (figure 1.1b). Les travaux qui suivirent décrivirent la coupe par trois zones. La première étant la zone de cisaillement primaire initialement décrite, la seconde étant située entre la face de coupe de l'outil et le copeau où se produit le frottement évoqué par Mallock et la troisième se situant au niveau du contact de la face en dépouille sur la surface usinée. Ces travaux introduisirent les trois principaux phénomènes qui caractérisent la coupe des métaux, à savoir :

- la plasticité,
- le frottement,
- la thermique.

Les premiers travaux sur la coupe étaient en grande majorité des observations du phénomène dans le but d'améliorer la tenue des outils dans les métaux, technologie alors récente. Datant de cette période, les travaux de Taylor (Taylor, 1907) demeurent encore aujourd'hui une référence pour le suivi de l'usure de l'outil.





**Figure. 1.1** Observations de la coupe des métaux par (a) Tresca (1878) et (b) Mallock (1881).

## 1.2 Paramétrage de la coupe

Une opération d'usinage est définie par certaines grandeurs appelées paramètres de coupe.

Deux sous-catégories peuvent être définies parmi ces paramètres ; les paramètres opératoires, liés aux mouvements de coupe, et les paramètres géométriques propres à l'outil.

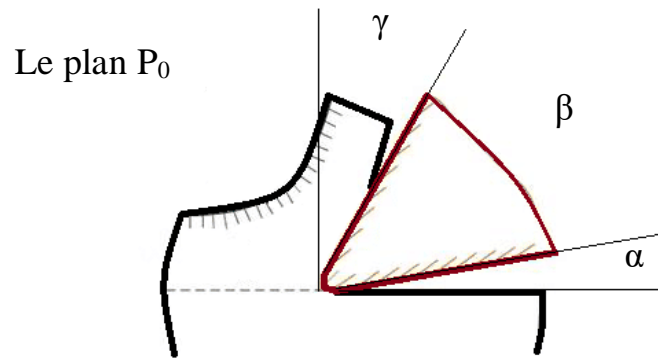
***Les paramètres opératoires comportent :***

- la vitesse de coupe  $V_c$  en m/min,
- l'avance par tour  $f$  en mm/tr,
- la profondeur de passe  $a_p$  en mm.

Pour une configuration d'arêtes de coupe multiples, e.g. en fraisage, l'avance par dent  $f_z$  sera définie ainsi que l'engagement radial  $a_e$ . Sont accessoirement définies la section de coupe  $AD$  en  $\text{mm}^2$  et l'épaisseur localement coupée  $h$  en mm.

***Les paramètres géométriques se résument généralement à :***

- l'angle de coupe  $\alpha$ ,
- l'angle de dépouille  $\lambda$ ,
- l'angle d'inclinaison d'arête  $\lambda_s$ ,
- l'angle de direction d'arête  $K_r$ ,
- le rayon d'acuité d'arête  $r$



**Figure. 1.2** Modélisation des angles de coupes, dans le cas d'une coupe orthogonale

Ces paramètres sont généralement associés à un indice correspondant au plan dans lequel est réalisée leur mesure (**cf. annexe A**). Dans un souci de simplification, la coupe des métaux est décrite dans une configuration dite de « coupe orthogonale ». Cette configuration permet de considérer que la formation du copeau est un problème plan. L'avantage principal concerne les hypothèses de modélisation. Les grandeurs mesurées en coupe orthogonale sont, par conséquent, mesurées dans le plan orthogonal  $P_0$  de l'outil. Par souci de simplification, la configuration de coupe oblique ne sera pas décrite ici, l'angle d'inclinaison  $\lambda_s$  est donc supposé nul. Les plans  $P_0$  et  $P_n$  sont alors confondus et les grandeurs décrivant la géométrie de l'outil se résument à :

- l'angle de dépouille  $\alpha$
- l'angle de tranchant  $\beta$
- l'angle de coupe  $\gamma$
- le rayon d'acuité d'arête  $r$

Les paramètres opératoires sont redéfinis par l'épaisseur coupée  $h_a$  et la largeur de coupe  $b$ , la vitesse de coupe reste inchangée.

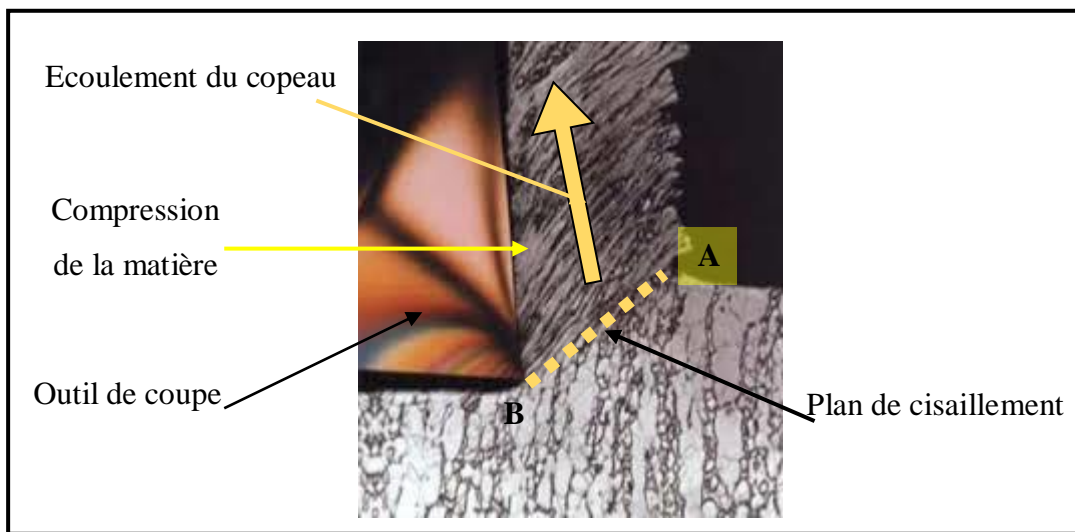
### 1.3 La formation du copeau

L'observation du copeau et de la surface usinée peut être faite en continue par l'utilisation d'une camera à prise de vue ultra rapide qui permet de faire une observation continue de la formation du copeau en coupe orthogonale, cette technique permet une observation externe à la matière et permet de juger de la stabilité du phénomène. Le procédé de la coupe brusquement interrompue permet de faire à un instant donné une observation plus fine, interne à la matière.

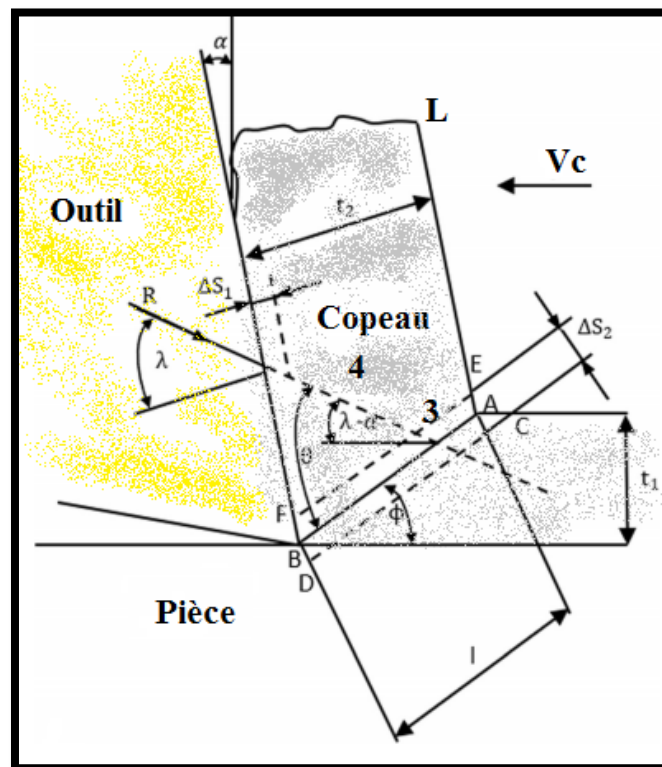
Lors d'un usinage par enlèvement de matière l'arrête de l'outil pénètre dans la pièce et enlève le copeau, qui est le résultat de plusieurs actions mécaniques complexes (figure 1.2):

- La compression de la matière sur la face d'attaque,
- Le cisaillement dynamique du copeau suivant le plan de cisaillement,
- L'écoulement du copeau.

Sur la figure 1.3 on montre la modélisation du phénomène de coupe d'après le modèle de Oxley (1963)



**Figure 1.2** Action mécanique complexe lors de la formation du copeau



**Figure 1.3** Modélisation de la coupe orthogonale d'après Oxley (Oxley PLB, 1963)

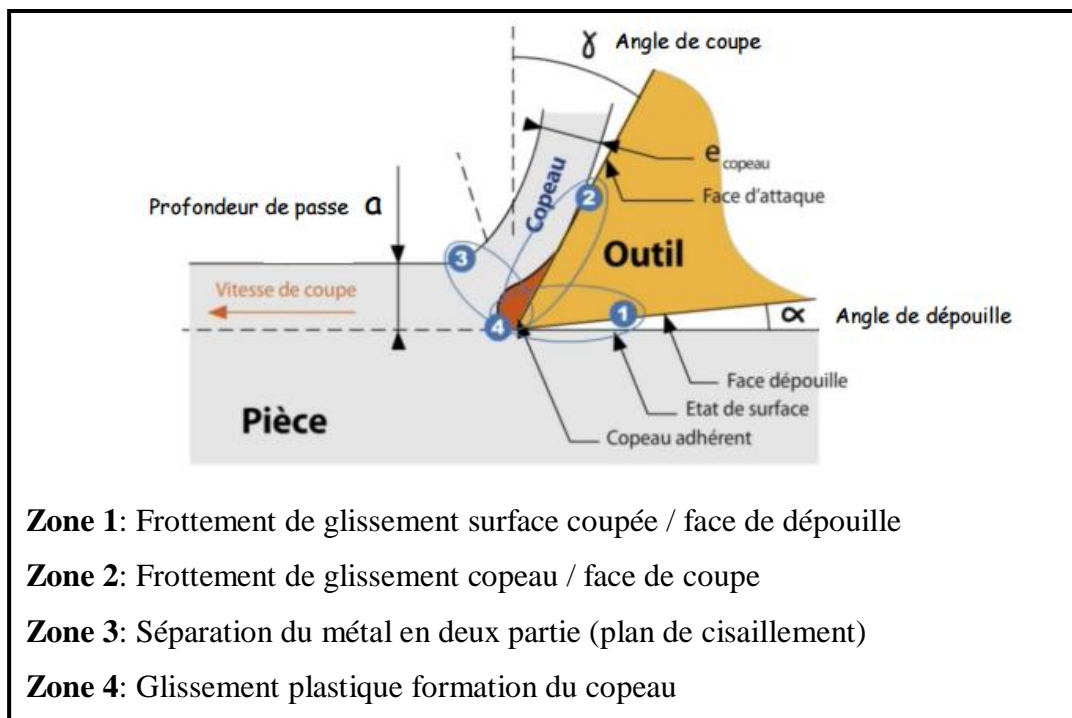
Oxley et al constatent que plus la vitesse de coupe  $V_c$  est grande, plus les lignes frontale BA et EF tendent à devenir rectiligne, parallèles et plus rapprochées l'une de l'autre, et plus inclinées sur la direction de Vitesse.

Si nous négligeons les faibles déformation dans le domaine EABF, le parallélisme des follets nous permet de dire que la déformation s'est faite par glissement plan unidirectionnel, donc faisant un angle constant avec la direction de la vitesse  $V_c$ .

Si en amont de EF et dans le plan de la figure nous avons tracé un cercle, en aval de CD, celui-ci est transformé en ellipse et le grand axe de celle-ci fait un angle  $\phi$  avec la direction commune des glissements.

En fin il convient de préciser qu'en pratique, les essais montrent un festonnement très fin de la surface libre EL du copeau: on n'en tiendra pas compte, car on ne sait pas dans quelle mesure la surface initiale était vierge, exempte de défauts microscopiques, et la couche superficielle exempte de contraintes ou d'écrouissage.

Dans les zones 3 et 4 la structure à fine bandes met en évidence le champs de glissement, d'autant plus intense que l'on s'approche de l'interface avec l'outil, comme si l'outil s'opposait à l'écoulement du métal.



**Figure 1.4** Formation du copeau lors du passage de l'outil dans la matière, (a) illustration des actions complexe résultantes de la formation du copeau, (b) modélisation géométrique d'après le modèle de Merchant de 1945.

L'outil suit une trajectoire par rapport à la pièce à usiner, ses mouvements étant assurés par les éléments constitutifs de la machine-outil. Le frottement du copeau sur la face de coupe et celui de la pièce sur la face de dépouille provoquent une élévation importante de la température qui peut entraîner une fusion locale du copeau.

***Remarque :** Ce phénomène peut conduire à l'adhérence du copeau sur la face de coupe (copeau adhérent).*

Les principaux facteurs influençant la **formation du copeau** et **l'état des surfaces usinées** sont :

- La vitesse de coupe (**V<sub>c</sub>**) ; si ce paramètre augmente la rugosité de la surface diminue,
- La profondeur de passe (**ap**),
- La vitesse d'avance (**f**),
- La géométrie de l'outil et son rayon de bec (**r**),
- La durée de vie de l'outil,
- Les matériaux de l'outil et de la pièce,
- La lubrification.

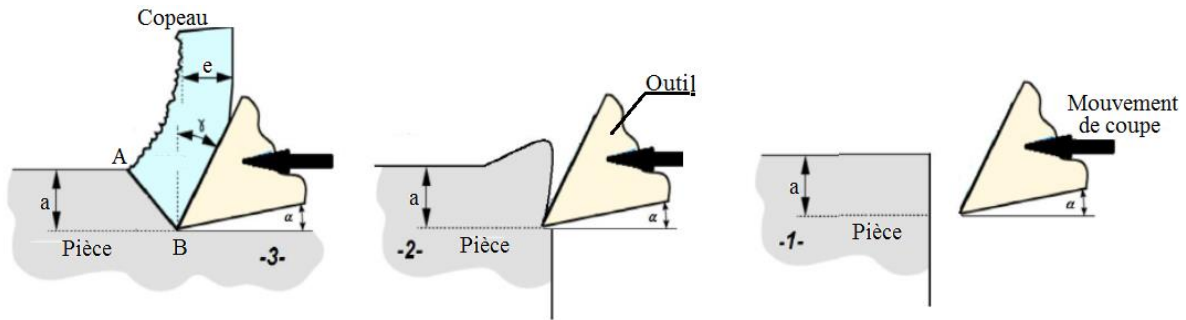
L'obtention d'un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidité de l'usinage, usure modérée de l'outil...) nécessite un bon choix et réglage des paramètres de coupe. Plusieurs critères permettant de définir ces paramètres sont à considérer dans ce contexte. Le schéma illustré ci-après représente un copeau en cours de formation. On observe que :

- L'épaisseur du copeau (**e**) est supérieure à la profondeur de passe,
- Les fibres du copeau sont orientées suivant une même direction,
- La face du copeau en contact avec la surface de coupe est lisse alors que l'autre est rugueuse.

#### **1.4 Mécanisme de formation du copeau**

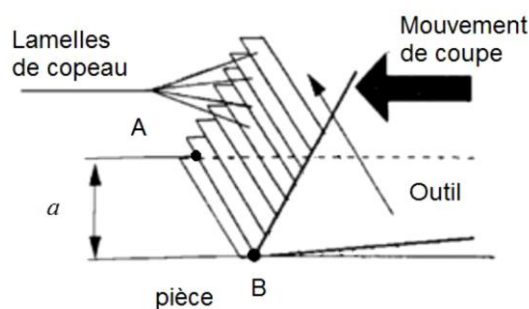
La surépaisseur de matière à enlever c'est la couche qui va former le copeau sous l'action mécanique complexe d'un outil de coupe, en utilisant une machine-outil comme le

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 1.5).



**Figure 1.5 . Etapes de formation de copeau**

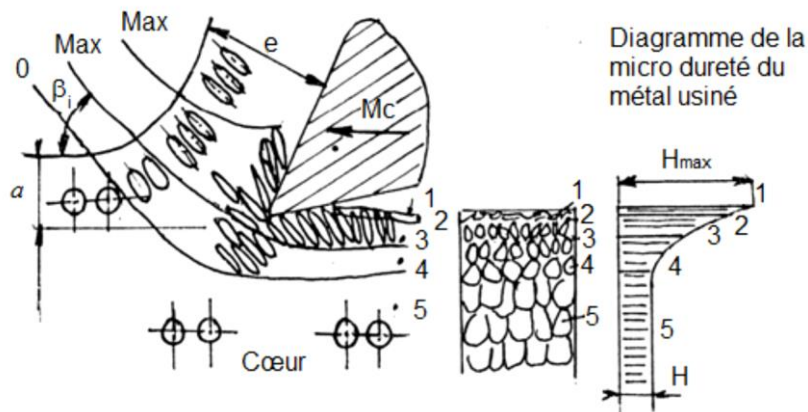
La majorité des études en *coupe orthogonale* ont établi que le copeau est formé de lamelles de matière orientées suivant une direction bien définie. Le copeau se détache de bloc de la pièce par l'effet de cisaillement entre deux lamelles avoisinantes aux bords de l'outil (B). le plan de cisaillement 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 1.6** Formation de copeau - analogie du paquet de cartes

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 1.7 Formation de copeau à l'échelle cristalline (S. BENSADA, 2000)**

### **1.5 Zones d'élaboration 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 localisées 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 1.8).

- 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 (CHERIF, 2003)

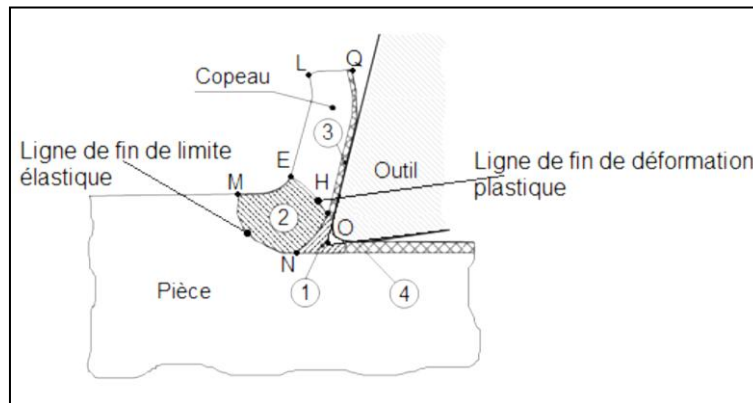
**Zone 2 :** zone de formation du copeau où on observe un changement brutal d'orientation et de vitesse d'écoulement de la matière, de la direction de la vitesse de coupe  $V_C$  au sens



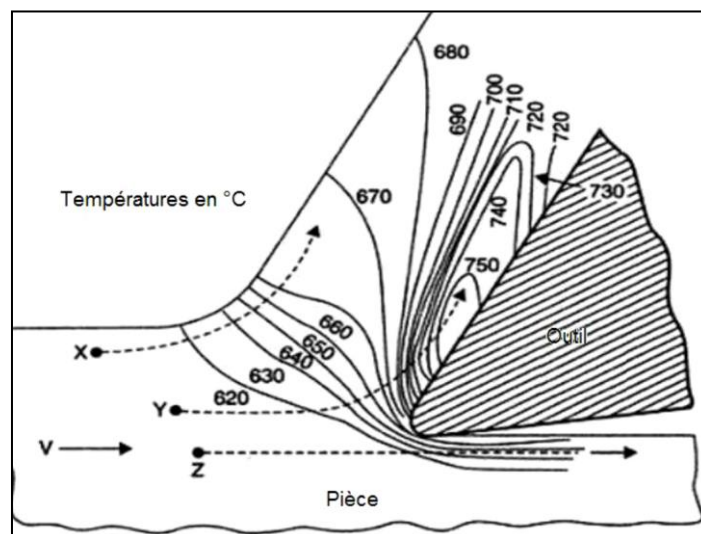
d'écoulement du copeau, en provoquant un glissement plastique limité par l'espace (LEHQ) et un important flux de chaleur transmis à l'outil (DARGNAT, 2006).

**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, ajoutant celle de la zone de cisaillement primaire, elle peut atteindre la température de fusion du matériau usiné (HABAK, 2006).

**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 (DARGNAT, 2006) (CHERIF, 2003).



**Figure 1.8.** Observation des zones en coupe orthogonale (DARGNAT, 2006) (CHERIF, 2003)



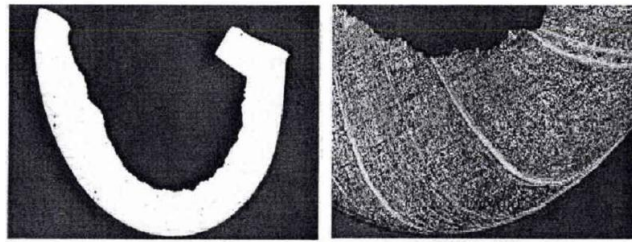


**Figure 1.9** Distribution des températures en coupe orthogonale (RAJENDRAN, 2000)

### 1.6 Formes du copeau en usinage

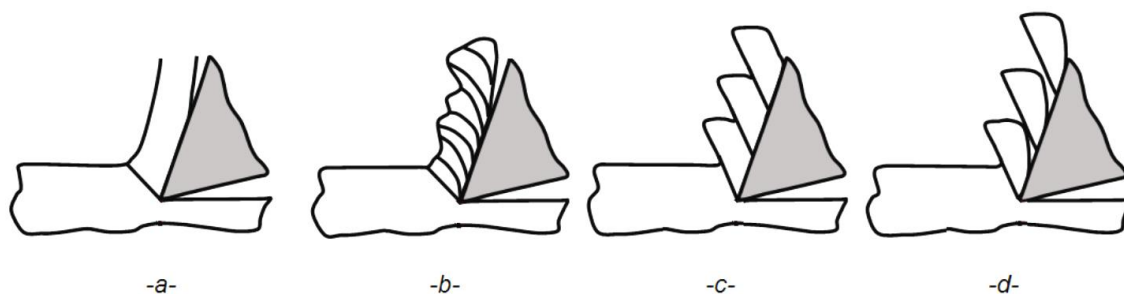
La complexité du mécanisme de formation de copeau, ne nous permet pas de maîtriser complètement les résultats de la coupe en matière de forme et de nature du copeau obtenus. Les copeaux peuvent être classifiés en deux types distincts : *continu*, *discontinu*. (MOHAMMAD, 2011), (NOUARI, 2000)

1. Les copeaux continus avec ou sans bande : formés dans un état de déformation plastique stationnaire en cisaillement adiabatique (Figure 1.10).
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 1.10** Copeau segmenté régulier et copeau segmenté irrégulier (d'après Heim 96, Sutter 97 et Faure 98) (NOUARI, 2000).

Il existe aussi d'autres copeaux intermédiaires entre un copeau continu et un copeau discontinu et d'autres géométries. (Figure 1.11)



**Figure 1.11** Formes de copeau en coupe orthogonale : a) copeau continu, b) copeau ondulé, c) copeau segmenté, d) copeau fragmenté (d'après Wagner 12) [Usinage par outil coupant , GN-3-PROFA, INSA Institute des sciences appliquées – Lyon – France, 2017.].

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.

**a. Copeaux continus**

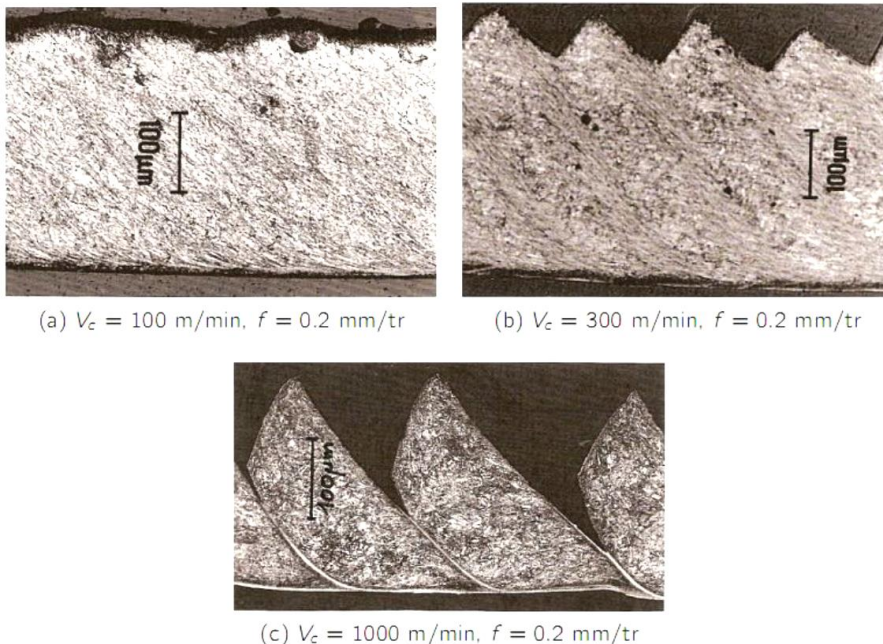
Le copeau continu n'est formé que par un processus de déformation plastique par cisaillement au niveau de la zone primaire, son écoulement continu le long de la face de coupe de l'outil, du fait que la valeur de la contrainte de cisaillement ne dépasse pas le point de rupture du métal. le copeau continu se manifeste en coupe des métaux ductile est à faible profondeur de passe à et vitesse de coupe  $V_c$  moyenne (Figure 1.12) (d'après Heim 96 et Faure 93) (NOUARI, 2000).

**b. Copeaux 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 1.12) (d'après Heim 96 et Faure 93) (NOUARI, 2000).

**1.7 Classification de la forme géométrique des copeaux**

Une norme a été établis pour classier les copeaux obtenus en usinage, tableau 1.1 (NFE 66 505).

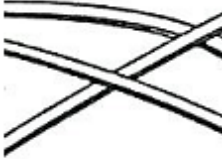







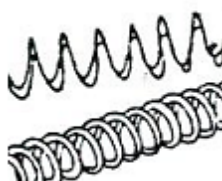
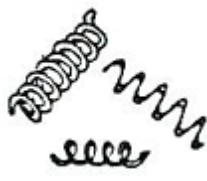










**Figure 1.12** Copeaux obtenus à différentes vitesses de coupe (a) continu, (b) faiblement discontinu et (c) fortement discontinu (d'après Le Calvez 95) (GERMAIN, 2011).

**Remarque 1.1**

- 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 usiner. 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 (C. GRUESCU, 2015).

**Tableau 1.1 Type de copeaux lors de l'usinage**

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 

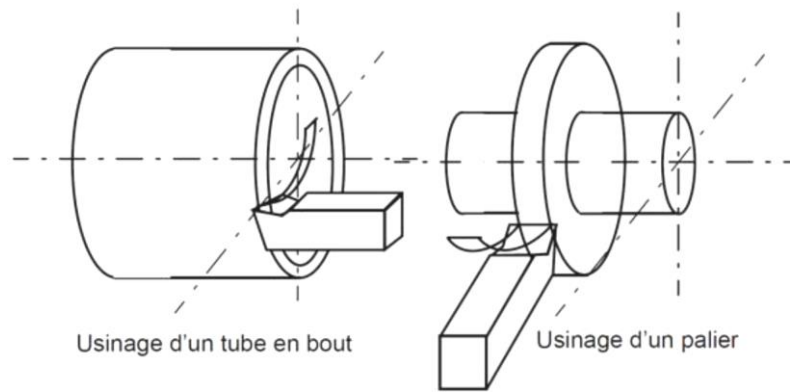
6 : Copeau élémentaire	61 : Enchevêtré 	62 : Détaché 	
7 : Copeau aiguille			
8 : Copeau en arc			

## **1.8 Configurations d'usinage**

En fonction du procédé de coupe étudié, la géométrie des outils diffère. Cependant, afin d'étudier la formation du copeau ou d'établir des modélisations (et ce quelque soit le procédé), des hypothèses simplificatrices sur la configuration d'usinage et la géométrie des outils sont réalisées. Selon la géométrie de l'arête de coupe, celle-ci peut être considérée globalement ou discrétisée permettant ainsi de se ramener au cas plus simple de la coupe orthogonale ou oblique.

### **1.8.1 Coupe orthogonale**

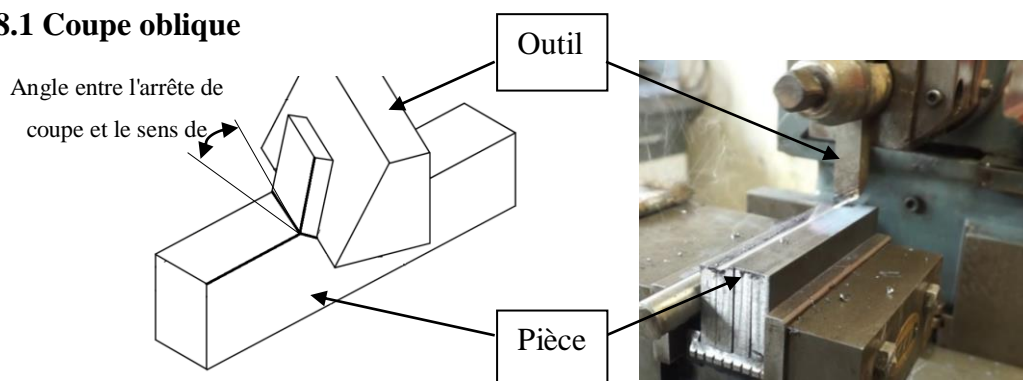
La coupe orthogonale est la configuration la plus simple pour usiner une pièce. Cette configuration est actuellement assez rarement employée dans le monde industriel. En effet, dans la pratique, seulement quelques procédés classiques permettent d'obtenir ces conditions comme par exemple le rabotage, le tournage de tube en bout et l'usinage de palier (Figure1.13) [*Le Calvez, 1995*].



**Figure 1.13** Cas industriel de configuration de coupe orthogonale, [Le Calvez, 1995].

La situation de coupe orthogonale (Figure 1.13) se rencontre lorsque l'outil coupe la matière avec une seule arête de coupe et lorsque cette dernière est perpendiculaire à la vitesse d'avance et à la vitesse de coupe  $V_c$ . Cette configuration est scientifiquement intéressante car elle permet d'isoler la formation du copeau sans introduire de phénomènes parasites tels qu'une variation de la vitesse de coupe, de la vitesse d'avance ou de la section du copeau, par exemple.

### 1.8.1 Coupe oblique



**Figure 1.14** Cas de surfacage sur étaux limeur

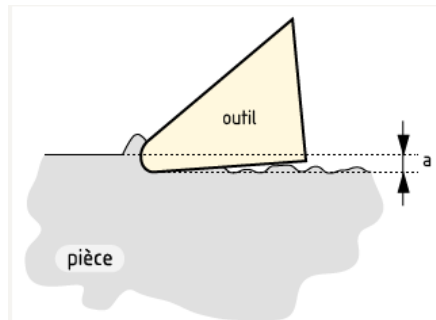
La situation de coupe oblique (Figure 1.14) se rencontre lorsque l'outil coupe la matière avec une seule arête de coupe et lorsque cette dernière est inclinée d'un angle défini à la vitesse d'avance et à la vitesse de coupe  $V_c$ .

### 1.9 La notion de copeau minimum

Lorsque la pénétration et/ou l'avance sont trop faibles, l'outil ne coupe plus (figure 1.15).

Le métal est donc comprimé superficiellement et la pression de contact outil-pièce provoque l'usure prématurée de l'outil ainsi que l'obtention d'un mauvais état de surface (phénomène d'écrouissage).

Il est donc impératif de choisir des valeurs minimales pour ces données (généralement ces valeurs sont données par le fabricant d'outils).



**Figure 1.15** Le copeau minimum (Cpm)

### **1.10 Les critères de choix des conditions de coupe**

Plusieurs critères permettent de définir les paramètres de la coupe :

- Le type de machine (tour, fraiseuse, perceuse) et sa puissance,
- La matière usinée (acier, aluminium, etc.),
- La matière de l'outil (ARS, carbure métallique...),
- Le type d'opération (chariotage, dressage, ébauche, finition, surfacage, perçage, etc....).

L'objectif final est d'obtenir une pièce usinée dans de bonnes conditions. Pour cela il faut déterminer certains paramètres spécifiques, notamment :

- La vitesse de coupe,
- La vitesse d'avance,
- La profondeur de passe.

#### **a. Le type et la puissance de la machine**

Selon l'opération à réaliser, il faut choisir la méthode d'usinage, et donc faire le choix de la machine à utiliser (tour, fraiseuse, perceuse, etc...).

La puissance de la machine influe sur ses performances. Pour l'usinage par enlèvement de matière, il y a deux grands cas de figure :

- *Usinage en ébauche*, où l'on cherche à enlever un maximum de matière en un minimum de temps. L'objectif est dans ce cas d'augmenter au maximum le débit de copeaux.

Mais la machine doit être suffisamment puissante, ainsi que l'attachement pièce/porte-pièce, sinon la machine peut "caler", ou la pièce peut voler.

- *Usinage en finition*. Pour ce type d'opération c'est la qualité de réalisation qui est importante : la surface doit être lisse, les côtes doivent être correctes. Comme les efforts en jeu sont plus faibles que pour une ébauche, la puissance de la machine n'est plus un critère primordial.

#### **b. La matière de la pièce**

Les efforts de coupe sont différents, selon la matière dont est constituée la pièce. La matière a donc une influence importante sur les choix relatifs à la puissance machine.

#### **c. La matière de l'outil**

Compte tenu du fait que c'est l'outil qui doit usiner la pièce (et non l'inverse) il est important de choisir des outils dont l'usure est moindre et dont la durée de vie est la plus grande possible.

#### **d. Le type d'opération et la forme de l'outil**

Compte tenu du type des surfaces à obtenir il faut choisir l'opération et l'outil adéquat. Dans une grande majorité de situations plusieurs possibilités pour réaliser un même type d'usinage existent, le choix étant dans cette situation influencé par les paramètres précédemment énoncés.



## **Chapitre 2**

### **Conception des outils de coupe (géométrie et matériau)**

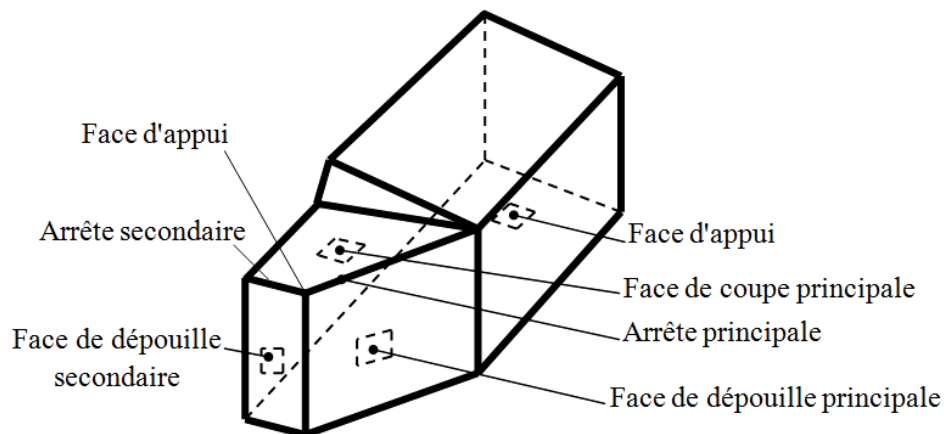
## **Chapitre 2 Conception des outils de coupe (géométrie et matériau)**

### **2.1 Introduction**

L'outil de coupe est l'un des considérations les plus importante dans une étude d'usinabilité des matériaux, il doit satisfaire plusieurs critères afin d'assurer un comportement optimum en terme de qualité de surface obtenue ( finition de la pièce) et en terme de durée de vie (tenu à l'usure qui sera traité au chapitre suivant). La bonne conception d'un outil de coupe doit satisfaire deux grand critères:

- Sa forme géométrique (design et dimensions)
- Son matériau (en un seul bloc ou assemblé)

### **2.2 Forme géométrique des outils de coupe**



**Figure 2.1 Composition et géométrie de base d'un outil de coupe dit en main**

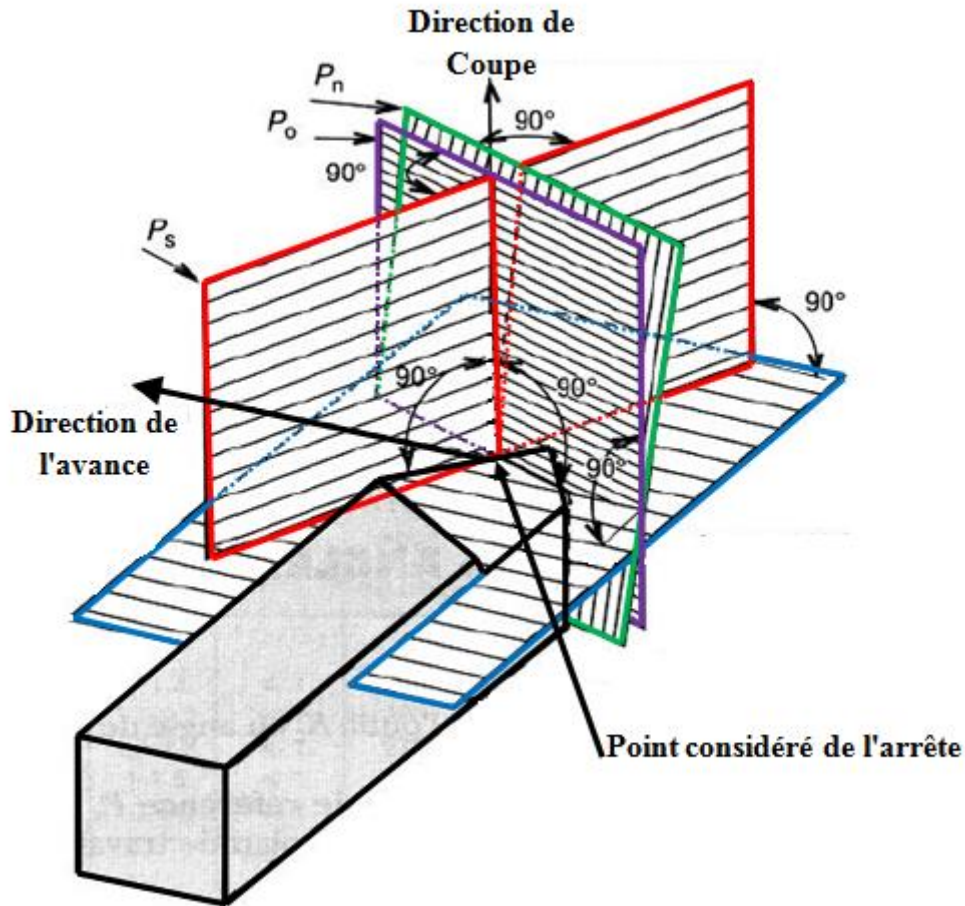


Figure 2.2 Plans sur un outil en main [Norme NF E 66-502]

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

- $\alpha$  : angle de dépouille principal
- $\beta$  : angle de taillant
- $\gamma$  : angle de coupe
- $\psi$  : 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 :  $\alpha_f$ ,  $\beta_f$  et  $\gamma_f$ .

### Remarque

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.

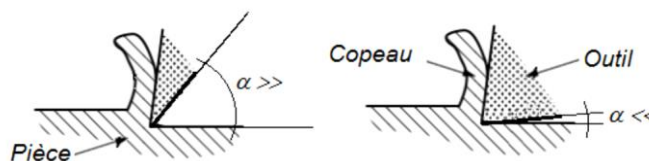
### 2.3 Influence sur la coupe et définition des principaux angles

L'angle de **direction d'arête principale**  $Kr$  est l'angle mesuré dans le plan de référence  $Pr$  entre le plan d'arête de l'outil  $Ps$  et plan de travail conventionnel  $Pf$ . L'angle de direction d'arête est un facteur déterminant dans le choix de la machine suivant sa puissance.

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

L'angle de **direction d'arête secondaire**  $Kr'$  est l'angle mesuré dans le plan de référence  $Pr$  entre et la face de dépouille et le plan de travail conventionnel  $Pf$ . L'angle d'**inclinaison d'arête**  $\gamma_s$  est l'angle mesuré dans le plan d'arête de l'outil  $Ps$  entre l'arête et le plan  $Pr$  :

- les outils avec  $\gamma_s < 0^\circ$  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  $\gamma_s > 0^\circ$  s'utilisent pour des usinages de finition, les valeurs du copeau minimum étant plus faibles.
- L'angle de **dépouille**  $\alpha$  est l'angle entre le plan d'arête de l'outil  $Ps$  et la face de dépouille.
  - si l'angle  $\alpha$  est trop grand, l'outil présente une arête trop fragile ;
  - si l'angle  $\alpha$  est trop petit la surface de contact pièce/face de dépouille augmente, ce qui induit le risque de talonnage

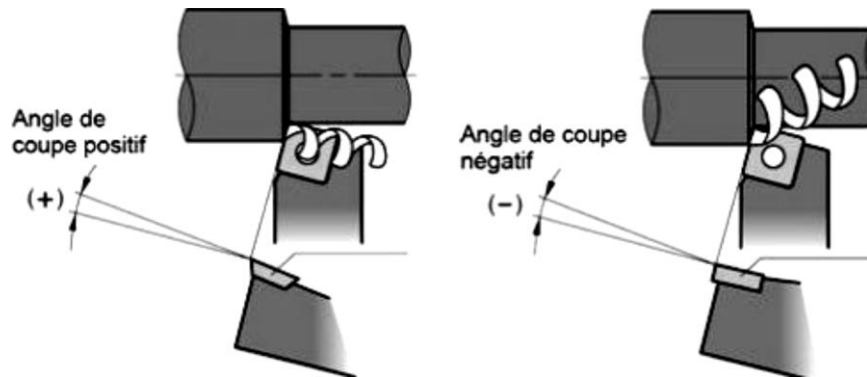


**Figure 2.3** Influence de l'angle de dépouille.

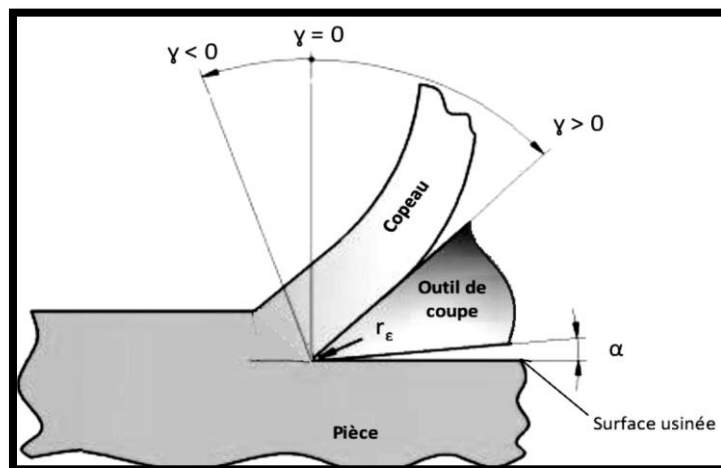
L'angle de **taillant**  $\beta$  est l'angle entre la face de dépouille et la face de coupe. l'angle de **pointe**  $\epsilon_r$  est l'angle mesuré dans le plan de référence  $Pr$  entre la face de dépouille principale et la face de dépouille secondaire.

L'angle de **coupe**  $\gamma$  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 2.5).

- un angle  $\gamma$  trop grand fragilise l'arête et provoque un écoulement continu de copeau ;
- un angle  $\gamma$  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 2.4** Influence de l'angle de coupe le sens déviation du copeau (SONGMENE, 2008)



**Figure 2.5** Position de l'angle de coupe en usinage (SONGMENE, 2008)

**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**

La somme de ces trois angles de dépouille, taillant et de coupe est toujours égale à  $90^\circ$   
 $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$  Dans le cas où la somme de  $\alpha$  et de  $\beta$  est supérieure à  $90^\circ$ , on travaille en coupe négative ( $\gamma$  est négatif). Les angles de direction d'arête principale  $Kr$ , de

pointe de l'outil  $\epsilon r$ , et de direction d'arête secondaire  $Kr'$  leur somme est égale à  $180^\circ$ .

$$Kr + \epsilon r + Kr' = 180^\circ$$

## 2.4 Opérations d'usinage et ses faciès

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.

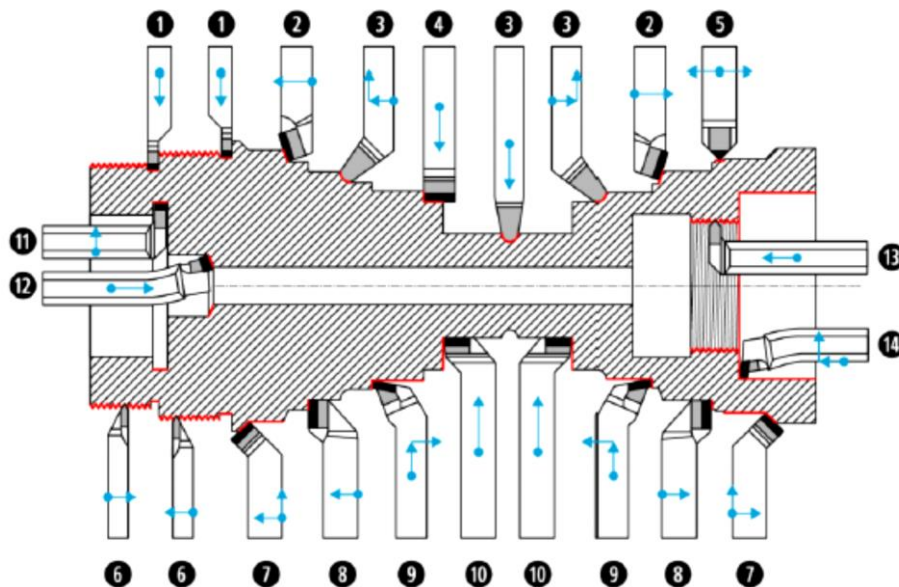
### a. En tournage

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

- Outils intérieurs ;
- Outils extérieurs.

La figure 2.6 représente les différentes opérations d'usinage pouvant être exécutées sur les tours.

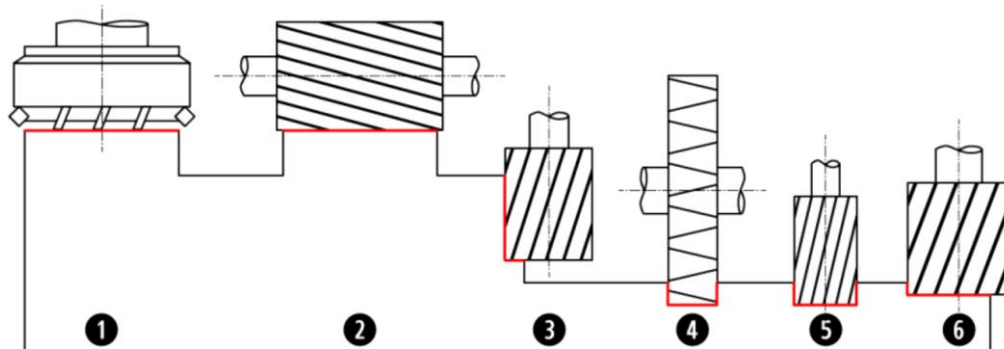
- |                                  |                                 |                                 |
|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 . Outil à saigner              | 2 . Outil à charioter droit     | 3 . Outil à retoucher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



**Figure.2.6** Opérations d'usinages en tournage.

**b. En fraisage**

Les diverses opérations d'usinage qui peuvent être exécutées sur une fraiseuse sont représentées dans la figure 2.7.

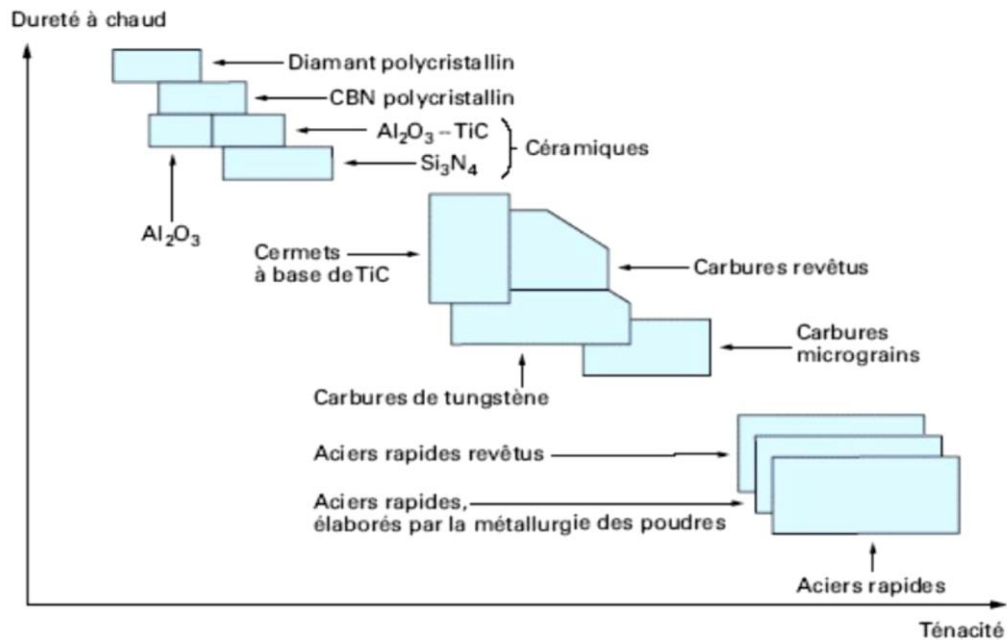


**Figure 2.7** Opérations d'usinages en tournage.

**2.5 Matériaux des outils de coupe**

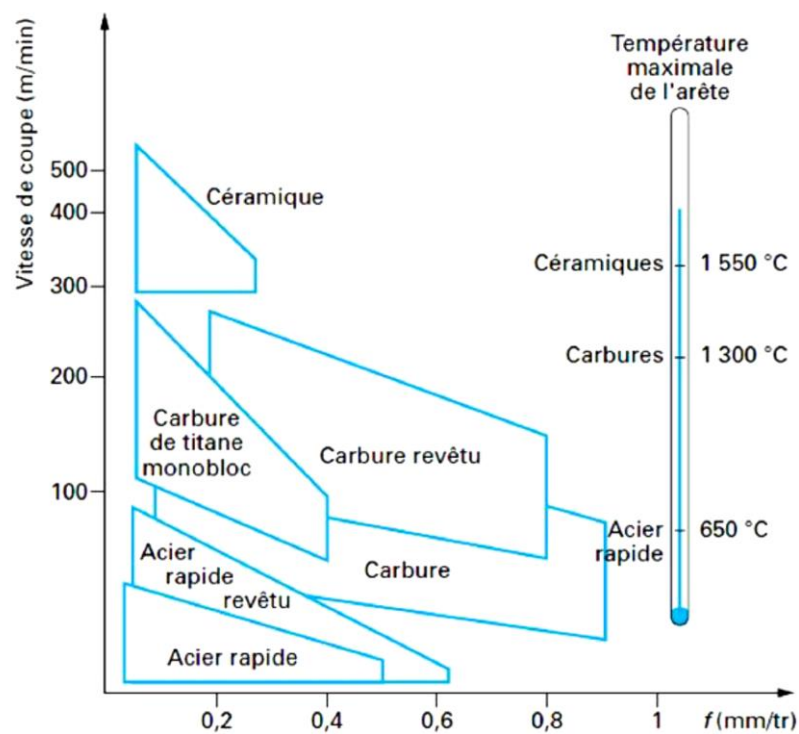
L'usinage des métaux ou des polymères nécessite l'utilisation de matériaux coupants ayant d'excellentes propriétés, une bonne dureté à haute température vue les frottements permanent outil / pièce et outil/copeau, de résistance à l'usure et de stabilité chimique.

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 2.8.



**Figure 2.8** Disposition des matériaux d'outil selon la ténacité et la dureté (PASSERONCE, 2007).

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 2.9 présente les nuances d'outils coupants et leurs domaines d'application.



**Figure.2.9** Matériaux à outil de coupe en fonction de paramètres de coupe (A. MOUFKI, 2002).



### **2.5.1 Les aciers rapides supérieur "ARS"**

Les outils ARS (Acier Rapides Supérieurs) sont élaborés à partir d'un acier faiblement allié subissant un traitement thermique. Il est toujours utilisé pour certains types d'outils comme les forêts, ou les outils nécessitant un angle de tranchant très faible Figure 2.10.

Ils ne permettent pas une vitesse de coupe élevée car un échauffement trop important élimine la trempe de l'outil, et crée donc un effondrement rapide de l'arête de coupe.

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 de ses caractéristiques (la trempe dispersée), une usure rapide de l'arête soit observée.



**Figure 2.10** Différents type d'outils en ARS en monobloc

Dureté : de 63 à 66 HRC

### **2.5.2 Les outils en carbures métalliques**

Les outils en carbures sont les plus utilisés actuellement. Il en existe de toutes formes pour chaque type de matériau et pour chaque type d'usinage.

Les principaux composants des outils en carbures métalliques sont le carbure de tungstène (phase  $\alpha$ ), et le carbure de titane, de tantale ou le niobium (phase  $\gamma$ ) et d'un élément de liaison entre les grains de carbure (taille de 0.2 à 1  $\mu\text{m}$ ) généralement du cobalt (phase  $\beta$ ) de l'ordre de 8 à 20% (J. L. BATTAGLIA, 2002).

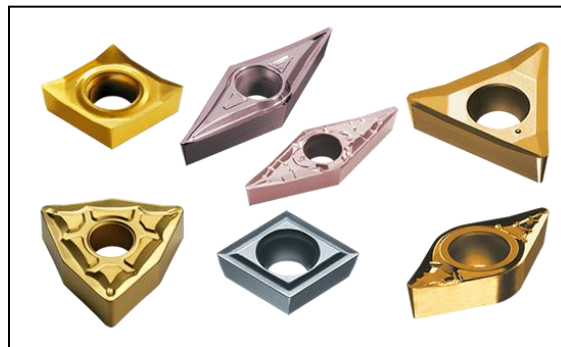
L'ajout du carbure de titane de tantale ou de niobium permet d'augmenter les propriétés à haute température (jusqu'à 1000°C) en réduisant le frottement, donc un choix de

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 (acier rapide) ou ARS (acier rapide supérieur). 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 (figure 2.11).

Ils sont souvent revêtus d'un carbure plus dur. On obtient ainsi une plaquette dont le noyau est tenace et dont la surface extérieure est très dure.

Fabrication : par frittage de poudre, puis revêtement

Composition : Noyau en carbure de tungstène ( $T^{\circ}$  de fusion  $2600^{\circ}$ ) Ou en carbure de titane ( $3100^{\circ}$ ), ou tantale ( $3780^{\circ}$ ) ou niobium ( $3500^{\circ}$ ) Liant : cobalt : le plus courant ou nickel. Revêtement en oxyde d'aluminium (céramique appelée corindon :  $Al_2O_3$ ).



**Figure 2.11** Différents type et forme de plaquettes en carbure

### **2.5.3 Les cermets**

Ce nom vient de céramique-métal car il représente les carbures ayant des particules de Titane, de carbonitrure de Titane ou de nitrure de Titane (figure 2.12).

Ces outils doivent être alliés à du carbure de Molybdène pour augmenter leur ténacité.

Ils sont utilisés pour des grandes vitesses de coupe associées à de faibles avances, donc pour de la finition.

Le matériau étant fragile, il ne faut pas d'interruption de coupe.



**Figure 2.12** Plaquette DNMG en Cermet (page 29).

#### **2.5.4 Les céramiques**

Ce sont, pour les outils de coupe, les oxydes et les nitrures : oxyde d'aluminium et nitrure de silicium.

Les céramiques ont une grande dureté (donc une faible ténacité) avec une grande stabilité à haute température et aucune réaction avec la matière usinée (figure 2.13).

Les céramiques permettent un grand débit de matière, mais nécessitent une grande stabilité de la machine, un strict respect des conditions de coupe et une méthode d'usinage adaptée (approche de l'outil).

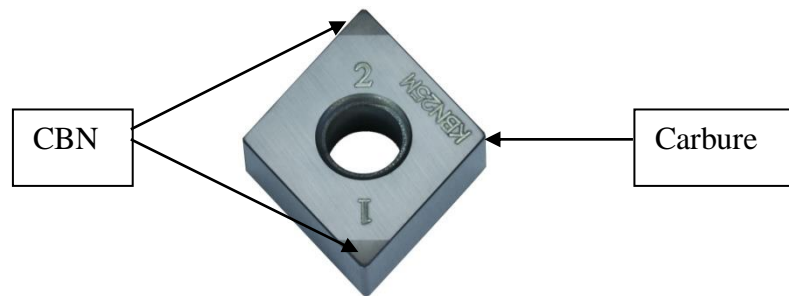


**Figure 2.13** Différents type et forme de plaquettes en céramiques.

### 2.5.5 Les nitrures cubique de bore CBN

Le CBN offre une très grande dureté, c'est le matériau le plus dur après le diamant. Il comporte l'avantage par rapport au diamant de ne pas s'oxyder à haute température. Il est aussi utilisé pour faire des meules de rectification, pour usiner les pièces dures... Son utilisation requiert (figure 2.14).

- Une machine stable
- Une grande rigidité de la pièce et du porte pièce
- Un arrosage



**Figure 2.14** Plaquette avec bout en CBN

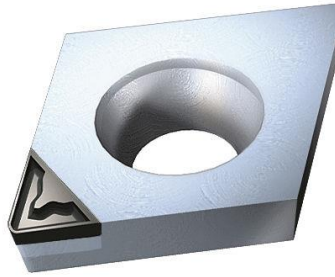
### 2.5.6 Les diamants

L'utilisation du diamant est fortement répandue comme constituant des meules, ou des grains de réaffûtage des meules.

Il a un faible coefficient de frottement ce qui limite l'apparition d'arête rapportée (donc peut d'encrassage).

Par contre, son énorme inconvénient réside dans sa non-stabilité à haute température. Un diamant soumis à une température de plus de 650 ° se transforme en un vulgaire morceau de graphite...

On ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux. Par contre, il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à basse température : alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissables... (figure 2.15)






















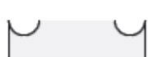





**Figure 2.15** Plaquette avec bout en Diamant

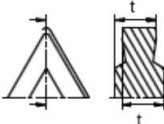
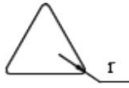
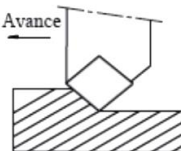
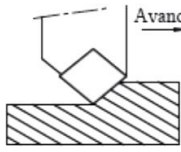
## **2.6 Codification ISO des plaquettes d'usinage**

En industrie il existe plusieurs fournisseur d'outillage de coupe, on peut cité SANDVIK Coromant, PHANTOM, WIDIA, SECO, DEREK, VORGEN, NIKKEN, WORLDIA, heimatec, ARNO....., ces fabricants proposent des solutions d'outillage suivant une codification ISO bien établie afin de reconnaître le produit selon sa forme géométrique et le matériau de fabrication, le tableau suivant illustre la codification ISO des plaquettes de tournage.

### **2.6.1 Codification ISO des plaquettes de tournage**

C	N	M	G		12	04	08	L
1	2	3	4		5	6	7	8

1	2	3	4																											
Forme de plaquette et angle dégagement	Angle de dépouille de l'arête principale	Tolérance $\pm$ sur t et d	Type de plaquette																											
<b>C</b>  80°	<b>B</b>  5°	<table><tr><th>Classe</th><th>t</th><th>d</th></tr><tr><td><b>G</b> <b>M</b> <b>U</b></td><td><math>\pm 0,13</math></td><td><math>\pm 0,025</math> <math>\pm 0,05 - \pm 0,15</math> (1) <math>\pm 0,08 - \pm 0,25</math> (1)</td></tr></table> <p>(1) Varie selon la valeur de d (ci-dessous)</p> <table><tr><th>Cercle inscrit d (mm)</th><th colspan="2">Classe de tolérance</th></tr><tr><th></th><th>M</th><th>U</th></tr><tr><td>3,97 5,0 5,56 6,0 6,35 8,0 9,525 10,0</td><td><math>\pm 0,05</math></td><td><math>\pm 0,08</math></td></tr><tr><td>12,0 12,7</td><td><math>\pm 0,08</math></td><td><math>\pm 0,13</math></td></tr><tr><td>15,875 16,0 19,05 20,0</td><td><math>\pm 0,10</math></td><td><math>\pm 0,18</math></td></tr><tr><td>25,0 25,4</td><td><math>\pm 0,13</math></td><td><math>\pm 0,25</math></td></tr><tr><td>31,75 32,0</td><td><math>\pm 0,15</math></td><td><math>\pm 0,25</math></td></tr></table> <div>    </div>	Classe	t	d	<b>G</b> <b>M</b> <b>U</b>	$\pm 0,13$	$\pm 0,025$ $\pm 0,05 - \pm 0,15$ (1) $\pm 0,08 - \pm 0,25$ (1)	Cercle inscrit d (mm)	Classe de tolérance			M	U	3,97 5,0 5,56 6,0 6,35 8,0 9,525 10,0	$\pm 0,05$	$\pm 0,08$	12,0 12,7	$\pm 0,08$	$\pm 0,13$	15,875 16,0 19,05 20,0	$\pm 0,10$	$\pm 0,18$	25,0 25,4	$\pm 0,13$	$\pm 0,25$	31,75 32,0	$\pm 0,15$	$\pm 0,25$	<b>A</b> 
Classe	t		d																											
<b>G</b> <b>M</b> <b>U</b>	$\pm 0,13$		$\pm 0,025$ $\pm 0,05 - \pm 0,15$ (1) $\pm 0,08 - \pm 0,25$ (1)																											
Cercle inscrit d (mm)	Classe de tolérance																													
	M		U																											
3,97 5,0 5,56 6,0 6,35 8,0 9,525 10,0	$\pm 0,05$		$\pm 0,08$																											
12,0 12,7	$\pm 0,08$		$\pm 0,13$																											
15,875 16,0 19,05 20,0	$\pm 0,10$		$\pm 0,18$																											
25,0 25,4	$\pm 0,13$		$\pm 0,25$																											
31,75 32,0	$\pm 0,15$		$\pm 0,25$																											
<b>D</b>  55°	<b>C</b>  7°	<b>G</b> 																												
<b>K</b>  55°	<b>E</b>  20°	<b>M</b> 																												
<b>R</b> 	<b>N</b>  0°	<b>N</b> 																												
<b>S</b> 	<b>P</b>  11°	<b>R</b> 																												
<b>T</b> 	<b>O</b> Description spéciale	<b>T</b> 																												
<b>V</b>  35°		<b>W</b> 																												
<b>W</b>  80°		<b>X</b> Description spéciale																												

5 Taille de la plaquette = Longueur d'arête en mm								6 Epaisseur de plaquette t en mm		7 Rayon $r_e$ en mm		8 Sens de coupe	
d (mm)	C	D	R	S	T	V	W						
3,97					06			01 t = 1,59		00 r = 0			
5,0			05		09			T1 t = 1,98		02 r = 0,2			
5,56			06					02 t = 2,38		04 r = 0,4			
6,0			08		11	11		03 t = 3,18		08 r = 0,8			
6,35	06	07	09	09	16	16		T3 t = 3,97		12 r = 1,2			
8,0			10					04 t = 4,76		16 r = 1,6			
9,525	09	11	12		22			05 t = 5,56		24 r = 2,4			
10,0			12		27			06 t = 6,35		32 r = 3,2			
12,0			15				08	07 t = 7,94					
12,7	12	15	12	12	33			09 t = 9,52					
15,875	16		15	15									
16,0			16										
19,05	19		19	19									
20,0			25										
25,0			25	25									
25,4	25		32										
32,0													

Pour les plaquettes de forme K (KNUX), seule la valeur théorique de l'arête de coupe est indiquée	
---	--

### 2.6.2 Codification ISO des plaquettes de fraissage

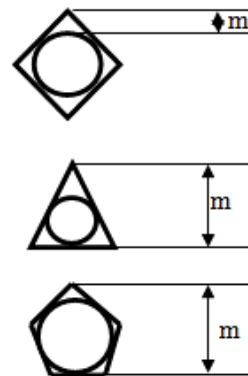
S	E	K	R		12	04	AF	S	N
1	2	3	4		5	6	7	8	9

1 Forme de la plaquette					
H	O	P	R	S	T
C	D	E	M	V	W
L	A	B	K		

2 Angle de dépouille de l'arête de coupe principale			
A	B	C	D
E	F	G	N
	Angle de dépouille différent requérant des descriptions spéciales		
P	O		

### 3 Tolérances

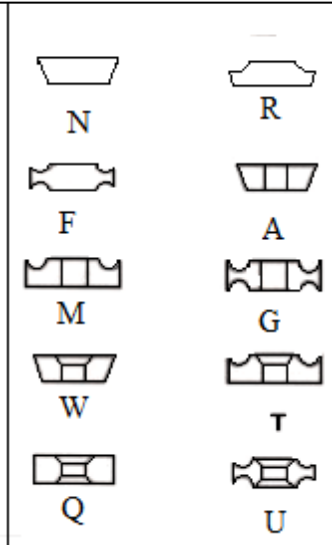
Lettre symbole	Tolérance, mm		
	m	t	d
A	±0.005	±0.025	±0.025
F	±0.005	±0.025	±0.013
C	±0.013	±0.025	±0.025
H	±0.013	±0.025	±0.013
E	±0.025	±0.025	±0.025
G	±0.025	±0.13	±0.025
J	±0.005	±0.025	±0.05 ±0.13
K	±0.013	±0.025	±0.05 ±0.13
L	±0.025	±0.025	±0.05 ±0.13
M	±0.08 ±0.18	±0.13	±0.05 ±0.13
N	±0.08 ±0.18	±0.025	±0.05 ±0.13
U	±0.13 ±0.38	±0.13	±0.08 ±0.25



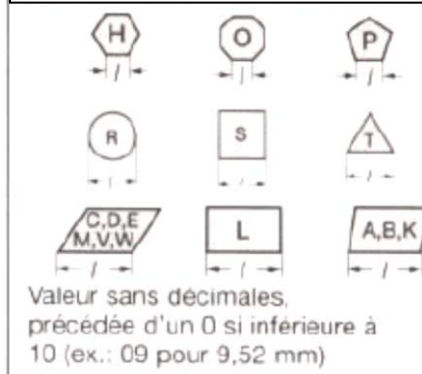
d: diamètre du cercle inscrit  
t: épaisseur de la plaquette  
m: voir figure

Formes de plaquettes H, O, P, S, T, C, E, M, W, R					Forme de plaquette D		
Cercle inscrit	Tolérance sur m		Tolérance sur d		Cercle inscrit	Tolérance sur m	Tolérance sur d
	Classe M	Classe U	Classe M J K L	Classe U			
6.35	±0.08	±0.13	±0.05	±0.08	6.35	±0.11	±0.05
9.52	±0.08	±0.13	±0.05	±0.08	9.52	±0.11	±0.05
12.7	±0.13	±0.2	±0.08	±0.13	12.7	±0.15	±0.08
15.87	±0.15	±0.27	±0.10	±0.18	15.87	±0.18	±0.10
19.05	±0.15	±0.27	±0.10	±0.18	19.05	±0.18	±0.10
25.4	±0.18	±0.38	±0.13	±0.25			

**4 Type de brise copeau et fixation**



**5 Longueur de l'arête de coupe en mm**



**6 Epaisseur de plaquette en mm**

<b>01</b> t = 1,59	<b>04</b> t = 4,76
<b>T1</b> t = 1,98	<b>05</b> t = 5,56
<b>02</b> t = 2,38	<b>06</b> t = 6,35
<b>03</b> t = 3,18	<b>07</b> t = 7,94
<b>T3</b> t = 3,97	<b>09</b> t = 9,52

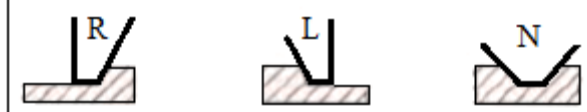
**7 Angle de dépouille**

Biseau plan		Rayon, mm
A - 45°	A - 3°	00 - Vif
D - 60°	B - 5°	02 - 0,2
E - 75°	C - 7°	04 - 0,4
F - 85°	D - 15°	08 - 0,8
P - 90°	E - 20°	12 - 1,2
Z - Autres	F - 25°	16 - 1,6
	G - 30°	20 - 2,0
	N - 0°	24 - 2,4
	P - 11°	32 - 3,2
	Z - Autres	X - Autres

**8 Forme de l'arête de coupe**

<b>F</b>	Arête de coupe vive
<b>E</b>	Arête traitée
<b>T</b>	Chanfrein négatif
<b>S</b>	Arête chanfreinée et traitée ER

**9 Direction de l'avance**





## **Chapitre 3**

Usure des outils de coupe

## Chapitre 3 Usure des outils de coupe

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 sèbres contraintes thermomécaniques. La ruine de l'outil est soutenues par différents types d'usure et sous l'effet de différents mécanismes.

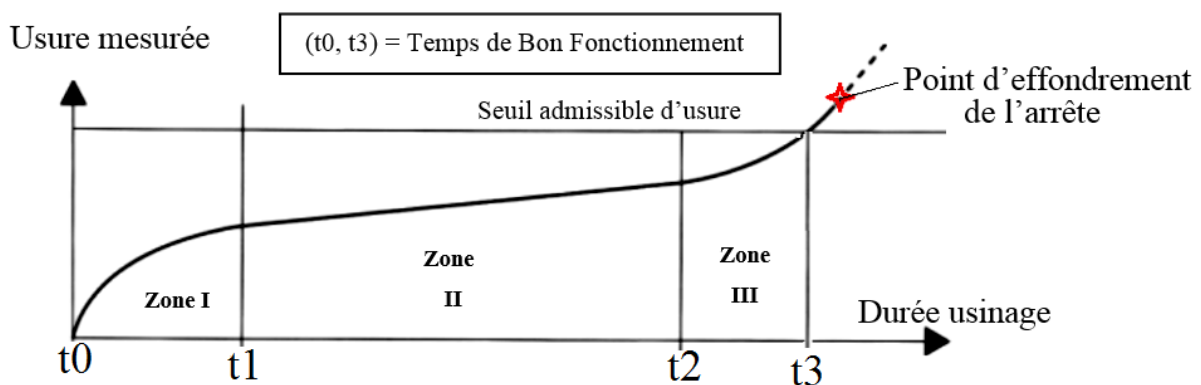
### 3.1 Définition de l'usure

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 3.1 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 3.1** Evolution de l'usure en fonction du temps de travail de l'outil

### **3.2 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 (MOHAMMAD, 2011).

#### ***a. 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.

#### ***b. 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.

#### ***c. 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.

#### ***d. Usure par déformation plastique de l'outil***

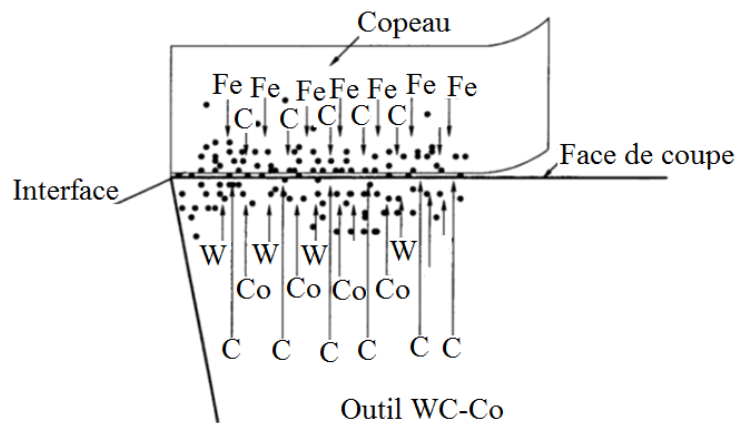
L'association des fortes pressions et des hautes températures à l'interface (outil/copeau) sera traduite par un abaissement (déformation) plastique du bec de l'outil. La seconde catégorie se produit par réactions chimiques et/ou effet tribologique, elle regroupe essentiellement deux types d'usures :

#### ***Usure par diffusion***

À des hautes températures la structure changée 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 3.2).

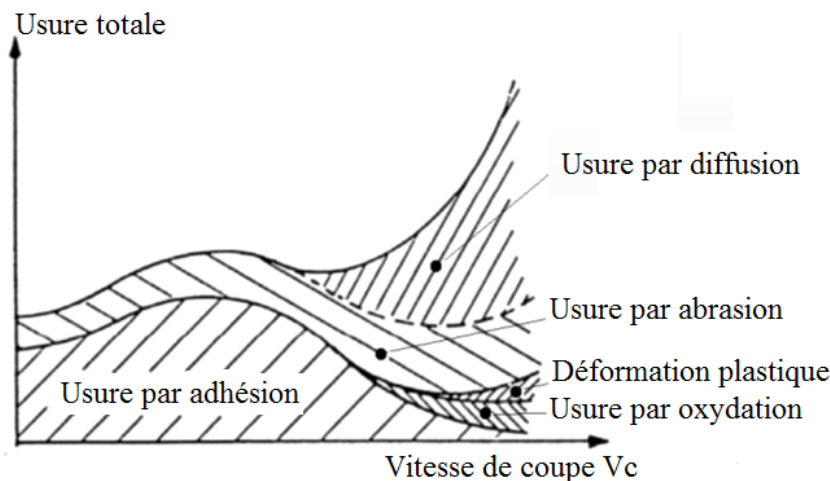
#### ***Usure par corrosion***

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 3.2** Schéma de diffusion à l'interface Copeau-Outil (NOUARI, 2000).

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 3.3)



**Figure 3.3** Evolution des processus d'usure en fonction de la température (d'après Opitz, König 67).

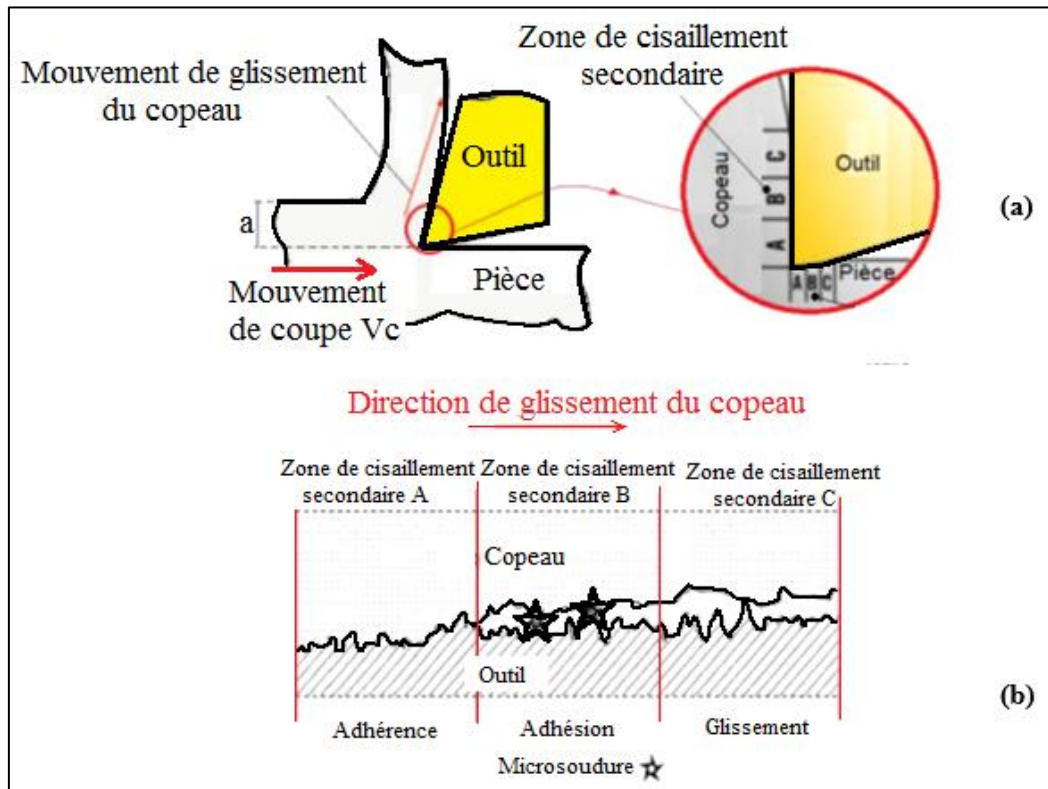
### Remarque 3.1

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 3.4.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 3.4.b)

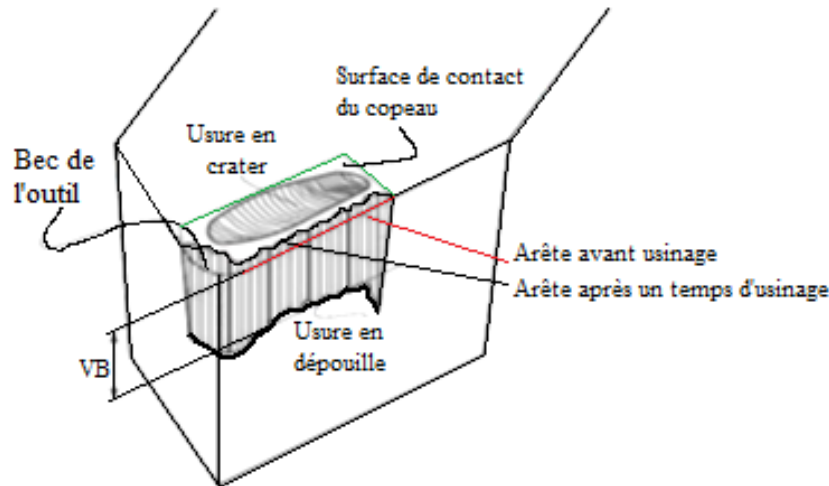


**Figure 3.4** Différents types d'usure en coupe des métaux [industrie-mag.com]

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.

### 3.3 Critères 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 3.5). 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 3.5 Aspects d'usures constatés dans un outil de coupe (RAJENDRAN, 2000)*

Le tableau 3.1 regroupe les principaux résultats de recherches par investigation macroscopique des modes d'usure en donnant les causes et les corrections probables.

### 3.4 Paramètres d'usure d'outil de coupe

La figure 3.6 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 :

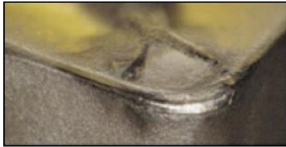



#### *a. Usure en cratère*


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 3.6) ***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 défini.

#### *b. 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 3.6.b), elle est provoquée par le frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil, ayant pour paramètre ***VB***.

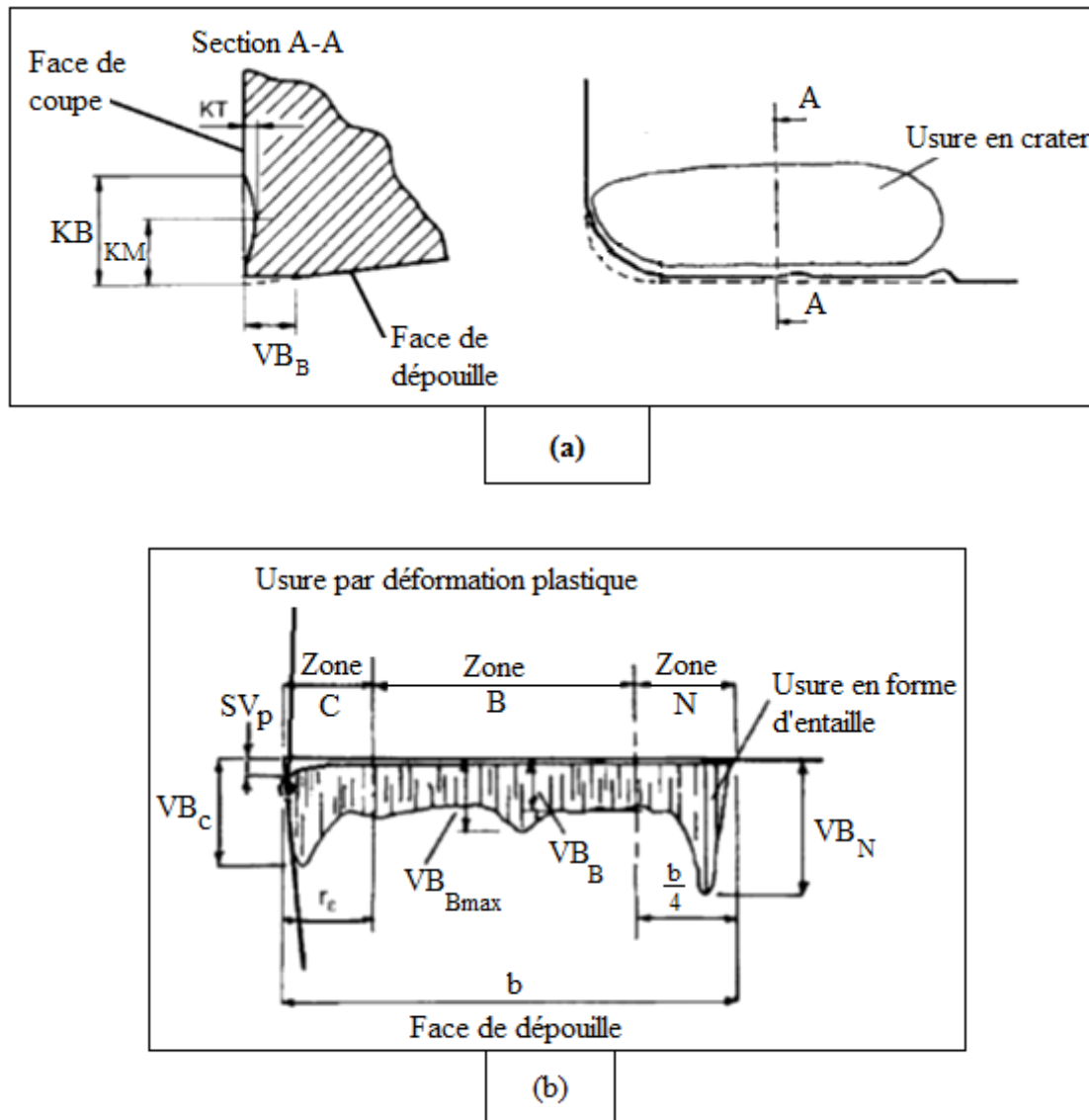
**Tableau 3.1** Principaux usure observées dans un outil de coupe [mmus-carbide.com]

Formes d'usures d'outil		Causes	Corrections
<b>Usure en dépouille</b>		<p>Nuance d'outil est trop faible.</p> <p>-Vitesse de coupe <math>V_c</math> est trop élevée.</p> <p>-Angle de dépouille est trop petit.</p> <p>-Taux d'alimentation (vitesse d'avance) <math>V_f</math> est extrêmement faible.</p>	<p>-Qualité d'outil avec une résistance élevée à l'usure (plaquette avec revêtement <math>Al_2O_3</math>).</p> <p>-Vitesse de coupe <math>V_c</math> réduite.</p> <p>-Augmenter l'angle de dépouille.</p> <p>-Augmenter le taux d'alimentation <math>V_f</math>.</p>
<b>Usure en cratère</b>		<p>-Nuance d'outil est trop faible.</p> <p>-Vitesse de coupe <math>V_c</math> est trop élevée.</p> <p>-Taux d'alimentation <math>V_f</math> est trop élevé.</p> <p>-Température trop importante</p>	<p>-Qualité d'outil avec une résistance élevée à l'usure.</p> <p>-Vitesse de coupe <math>V_c</math> réduite.</p> <p>-Taux d'alimentation réduit <math>V_f</math>.</p>
<b>Usure par ébréchure</b>		<p>-Nuance d'outil est trop faible.</p>	<p>-Outil à ténacité élevée.</p> <p>-Taux d'alimentation <math>V_f</math> réduit.</p>
<b>Fracture du bec d'outil</b>		<p>-Taux d'alimentation <math>V_f</math> est trop élevé.</p> <p>-Manque de résistance des arêtes de coupe.</p> <p>-Manque de rigidité de la tige ou du support.</p>	<p>-Augmenter la profondeur de passe pour absorber le choc.</p> <p>-Utilisez une tige de grande taille à forte rigidité.</p> <p>-Vitesse de coupe <math>V_c</math> réduite.</p>

<p align="center"><b>Usure par déformation Plastique</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Nuance d'outil est trop faible.</li> <li>-Vitesse de coupe <math>V_c</math> est trop élevée.</li> <li>-Profondeur de coupe et le taux d'alimentation sont trop importants.</li> <li>-Température de coupe est élevée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Outil à haute résistance à l'usure.</li> <li>-Vitesse de coupe <math>V_c</math> réduite.</li> <li>-Diminuez la profondeur de passe et le taux d'alimentation <math>V_f</math>.</li> <li>-Qualité d'outil avec haute conductivité thermique.</li> <li>-Usinage lubrifié.</li> </ul>
<p align="center"><b>Usure par soudure ou Arête rapportée</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Vitesse de coupe <math>V_c</math> est faible.</li> <li>-Géométrie d'outil inadapté.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Augmenter la vitesse de coupe <math>V_c</math>.</li> <li>-Augmenter l'angle de coupe.</li> <li>-Qualité d'outil avec une faible affinité. (grade enduit, grade cermet)</li> </ul>
<p align="center"><b>Usure par fissuration en peigne</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Fluctuations thermique en coupe.</li> <li>-Nuance d'outil est trop faible.</li> <li>-Observé surtout en fraisage.</li> <li>-Arrosage intermittent.</li> <li>-Usinage intermittent.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Coupe à sec. (pour la coupe humide, inonder la pièce avec du fluide de coupe)</li> <li>-Qualité d'outil avec une ténacité élevée.</li> </ul>
<p align="center"><b>Usure en entaille</b></p>		<p>Surface dure telle que surface non coupée, pièce refroidie et couche durcie par usinage.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Friction causée par des copeaux de forme irrégulière. (causée par</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Qualité d'outil avec une grande résistance à l'usure</li> <li>-Augmentez l'angle de coupe pour améliorer la netteté.</li> </ul>



		de petites vibrations)	
<b>Usure par écaillage</b>		<ul style="list-style-type: none"><li>-Arête rapportée.</li><li>-Mauvaise élimination du copeau.</li><li>-Géométrie trop fragile.</li><li>-Nuance d'outil est trop faible</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Outil à ténacité élevée.</li><li>-Augmentez l'angle de coupe</li><li>-Augmentez le chanfrein du bec.</li><li>-Réduire le taux d'alimentation <math>V_f</math> au début de la coupe.</li></ul>



**Figure.3.6** Modèles typique d'usure d'outil de coupe selon ISO 3685-1977 (L. CERCE, 2012)

La largeur  $b$  de la bonde 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 3.6.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 bonde d'usure qui correspond à l'usure en dépouille, c'est valeur la hauteur de la bonde  $VB_B$  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 3.2**

**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, (figure 3.6 (a))
- $VB_{Bmax} = 0,6\text{mm}$  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.

### **3.5 Durée de coupe d'un outil**

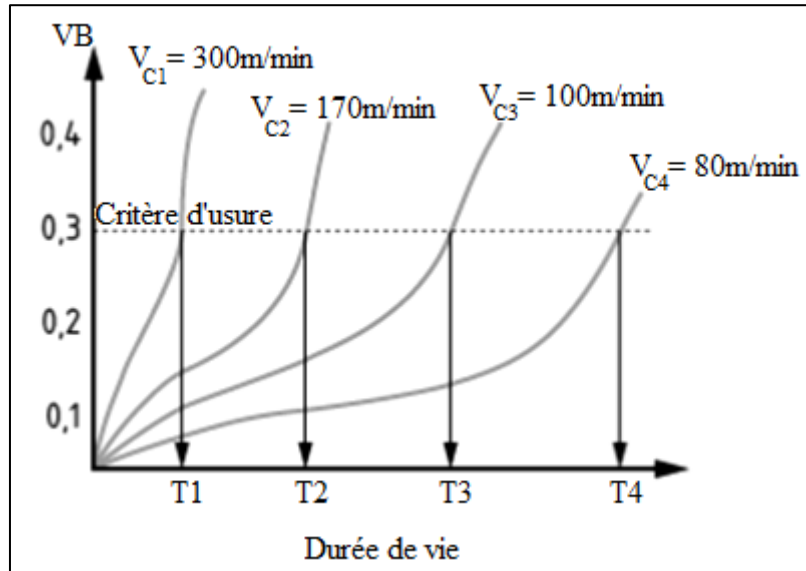
Par définition la durée de coupe ou de vie  $T$  d'un outil selon la norme ISO 3685 : *C'est le temps de coupe totale d'un outil nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique.* Il est nécessaire de passer par une approche expérimentale, pour arriver à estimer le temps de service d'un outil de coupe pour des conditions de coupe bien définies, en général c'est le critère d'usure  $VBB$  ou  $KT$  qui est pris en compte. Des mesures de  $VBB$  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 3.7. 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 3.1) (BOURDET, 2004):

$$VB_B = A.(1 - e^{-\alpha t}) + B.(e^{\alpha t} - 1) \quad (3.1)$$

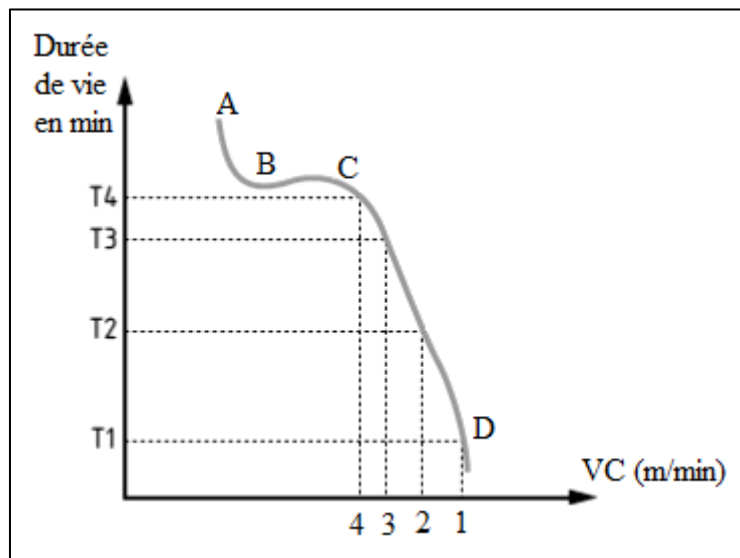
L'équation 3.1 est dite loi d'usure de l'outil, elle regroupe deux termes distincts. Le premier représente l'évolution de l'usure abrasive et le second celle de l'usure par diffusion.

L'équation 3.1 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 3.7** 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 3.8**) on remarque trois zones qui la caractérisent :

- **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.



**Figure 3.7** Evolution de l'usure frontale en fonction du temps, à différentes vitesses de coupe  $V_C$ , (C. GRUESCU, 2015) (BIERLA, 2009).



**Figure 3.8** Courbe de durée de vie en fonction de la vitesse de coupe (C. GRUESCU, 2015)

C'est en **1907** que **Taylor** a proposé son modèle pour estimer la durée de vie d'un outil (loi de Taylor). (**Equation 3.2**)

$$T = C_v \cdot V_c^n \quad (3.2)$$

- 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 3.2)

**Tableau 3.2** Valeurs moyenne de l'exposant  $n$  de la loi de Taylor.

Matériau d'outil	ARS	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 :  $104 < C_v < 1014$ .

Comme la courbe de la zone CD à une allure d'une droite (**figure 3.9**), la loi de Taylor serait la plus correcte. On déterminant les constantes  $C_v$  et  $n$  des données expérimentales la loi d'usure (l'équation de Taylor) seront déduite. A partir de cette loi, Il serait possible de fixer un temps de coupe et retrouver la vitesse de coupe associée. L'équation 3.3 peut être formulée comme suite :

$$V_c = T \alpha \quad (3.3)$$

$$\text{avec } \alpha = \frac{1}{n} \text{ et } CT = \left(\frac{1}{C_v}\right) \cdot \left(\frac{1}{n}\right)$$

**Tableau 3.3** Valeurs du coefficient  $\alpha$

Matériau d'outil	ARS	Carbure	Carbure revêtu
$\alpha$	0.1 – 0.125	0.2 – 0.3	0.4 – 0.5

D'autres modèles empiriques ont été annoncées après Taylor comme : (NOUARI, 2000)

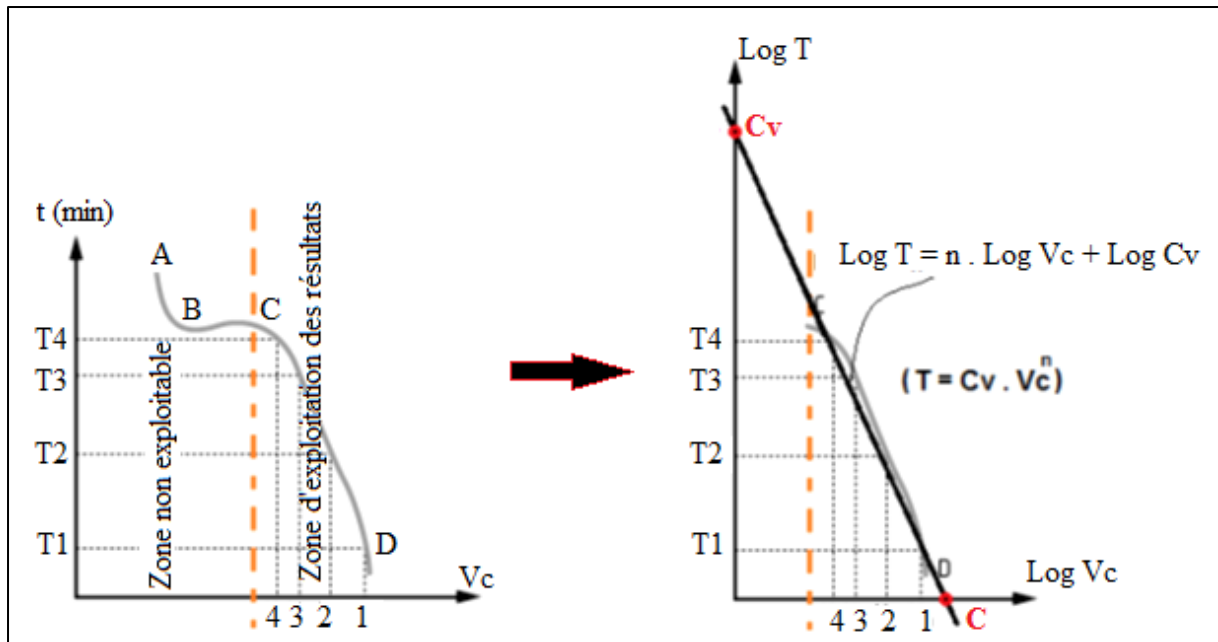


Figure.3.9 Analyse graphique par le loi de Taylor (C. GRUESCU, 2015).

### 3.6 Modèle de Gilbert ou le modèle de Taylor généralisé en 1950

$$T = C \cdot f^x \cdot a^y \cdot V_c^n \quad (3.4)$$

où  $f$  est l'avance,  $a$  est la profondeur de passe

La constante  $C$  : dépend du Couple Outil / Matière Les coefficients  $x$ ,  $y$  et  $n$  : dépendent que du matériau constituant l'outil, avec  $x \approx n/6$  et  $y \approx n/3$  et  $x, y, n$  sont toujours  $< 0$ .

#### Remarque 3.3

- La valeur de **VBB = 0,3 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  $VBB = 0,3$  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 3.4.

**Tableau 3.4** Valeurs du coefficient  $n$  selon l'opération et la matière usinée.

Outil de coup	Opération d'usinage	Matériau de la pièce à usiner			
		Acier	Fonte Grise	Fonte malléables	Alliage d'aluminium
Acier rapide supérieur	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 3.5).

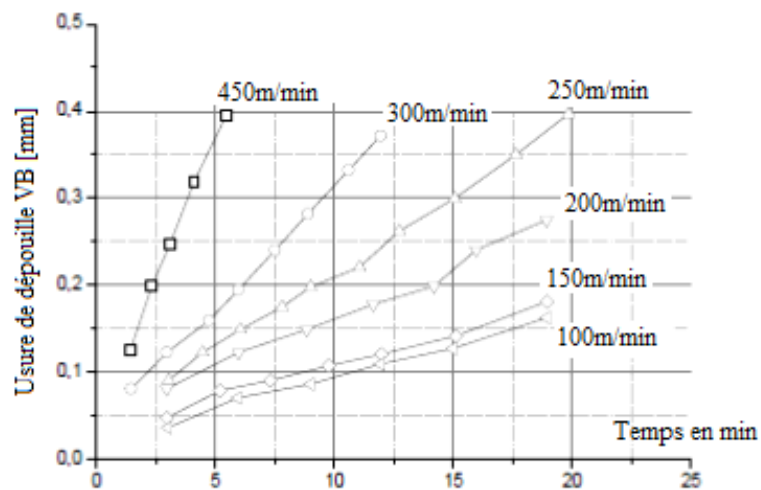
- Déterminer la loi d'usure (**loi de Taylor**) pour cette opération d'usinage.

**Tableau 3.5** Valeurs expérimentales de l'usure d'un outil de coupe après un temps d'usinage.-

Vc1 = 450m/min		Vc1 = 300m/min		Vc1 = 250m/min		Vc1 = 200m/min		Vc1 = 150m/min		Vc1 = 100m/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	0.2	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 3.5 sont représentées graphiquement dans la figure 3.10 :



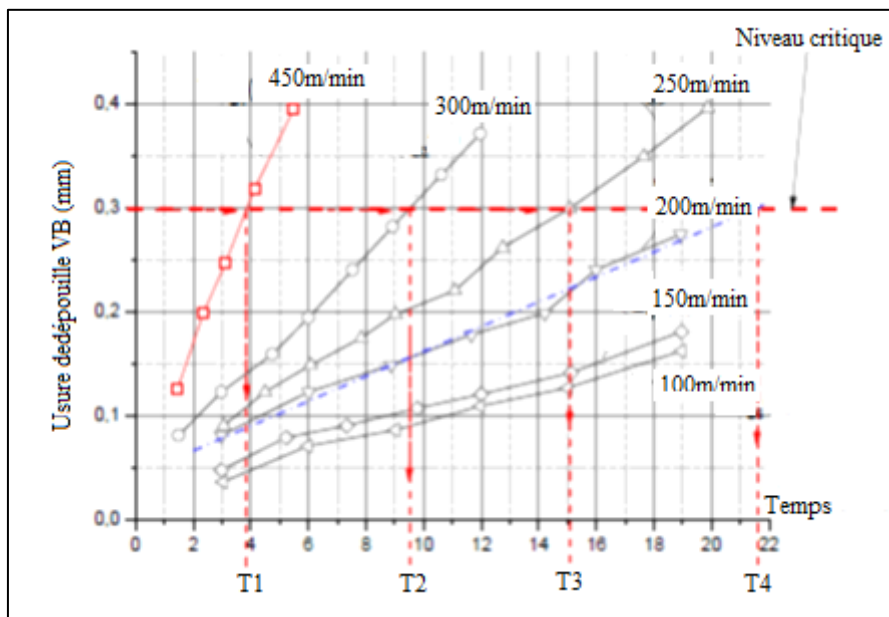
**Figure 3.10** Graphe de l'usure de dépouille VBB en fonction du temps pour différentes vitesses de coupes Vc.



A partir de la figure 3.10, 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  $V_{BB} = 0,3 \text{ mm}$ . (figure 3.11)

La droite qui représente  $V_{BB} = 0,3 \text{ mm} = C_{st}$  a des points d'intersection avec les courbes  $V_{BB1}(T)$ ,  $V_{BB2}(T)$ ,  $V_{BB3}(T)$  et  $V_{BB4}(T)$  qui correspondent respectivement aux vitesses  $VC1$ ,  $VC2$ ,  $VC3$  et  $VC4$ . Chaque point d'intersection a respectivement un temps d'usure  $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$  et  $T4$ .

Les temps  $T1$  et  $T2$  sont déterminés par simple interpolation linéaire des courbes  $V_{BB1}(T)$  et  $V_{BB2}(T)$ , le temps  $T3$  est tiré directement du tableau des données expérimentales (Tableau 3.5) où  $T3 = 15,07 \text{ min}$  et le temps  $T4$  est déduit par extrapolation linéaire de la courbe  $V_{BB4}(T)$ . Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 3.6 en matière de temps d'usure  $T$  et vitesse de coupe  $VC$ .



**Figure 3.11** Exploitation du graphe pour déterminer les temps d'usure ultimes à  $V_{BB}=0,3\text{mm}$

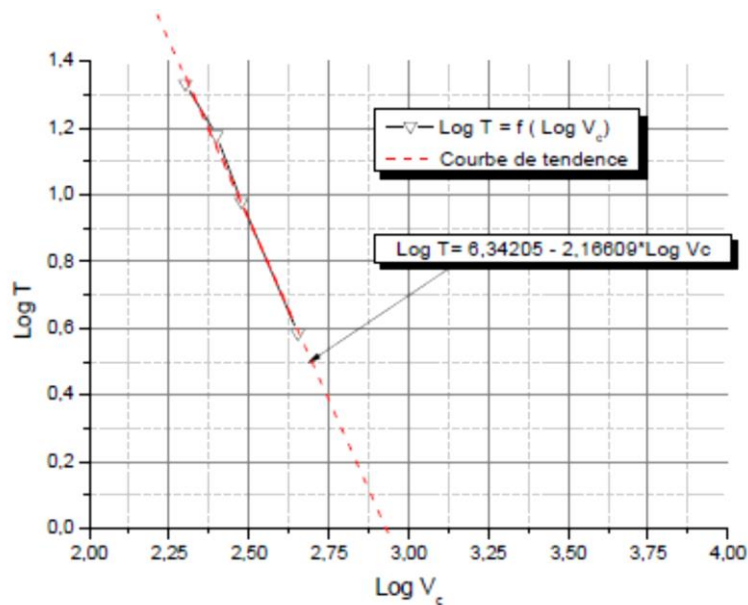
**Tableau 3.6** Temps d'usure à  $V_{BB}=0,3\text{mm}$  pour des vitesses variables  $V_c$

Points	$V_{ct}$	$T_t$	$\text{Log } V_{ct}$	$\text{Log } T_t$
1	450	3.85	2.65	0.58
2	300	9.55	2.48	0.98
3	250	15.07	2.4	1.18
4	200	21.59	2.3	1.33

**Première méthode (Méthode graphique)**

**Résolution N° 1**

Les résultats du tableau 3.6 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 3.12.



**Figure 3.12** Analyse graphique directe sur Excel

L'équation de la droite de tendance est de la forme (  $y = a \cdot x + b$  ). (figure 3.12)

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

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  $n = -2,16$

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

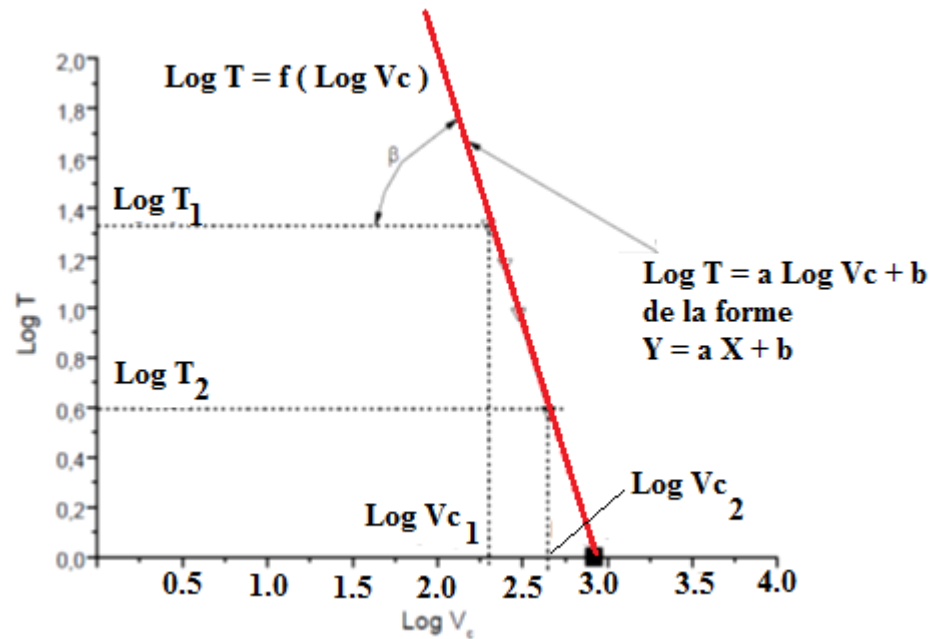
**Résolution N° 2**

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 3.12 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 3.13** 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 3.13, on dispose des points suivants  $(\text{Log } V_{c1} \text{Log } T_1)$  et  $(\text{Log } V_{c2} \text{Log } T_2)$ ,  $(\text{Log } V_c \text{Log } T)$ , par exemple (2.30 ; 1.33) et (2.65 ; 0.58).

La pente est donnée par :

$$a = n = \text{tg } \beta = \frac{\text{Log } T_1 - \text{Log } T_2}{\text{Log } V_{c1} - \text{Log } V_{c2}} = \frac{1.33 - 0.58}{2.30 - 2.65} = -2.1428$$

L'intersection avec l'axe des ordonnées (l'axe des vitesses (Ox)) donne le point  $\text{Log } V_{c0}$  d'où :

D'une part

$$n = tg\beta = \frac{\text{Log}T_1 - \text{Log}T_0}{\text{Log}V_{c1} - \text{Log}V_{c0}} = \frac{1.33 - 0}{2.30 - \text{Log}V_{c0}} = -2.1428$$

$$n = -2.1428$$

Après Calcul

$$\text{Log}V_{c0} = 2.30 + \frac{1.33}{2.1428} = 2.9206$$

d'autre part,

$$0 = \text{Log} C_v + n \text{Log} V_{c0}$$

d'où

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

et

$$C_v = 10^{6.26}$$

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

#### **Remarque 3.4**

- 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

$T = C_v V_c^n$  où la forme logarithmique linéaire est :  $\text{Log}T = \text{Log}C_v + n \text{Log}V_c$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = 21.59 \text{ min} \\ V_{c1} = 200 \text{ m/min} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} T_2 = 3.85 \text{ min} \\ V_{c2} = 450 \text{ m/min} \end{array} \right.$$

En remplaçant dans

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Log}T_1 = \text{Log}C_v + n\text{Log}V_{c1} \\ \text{Log}T_2 = \text{Log}C_v + n\text{Log}V_{c2} \\ \text{Log}21.59 = \text{Log}C_v + n\text{Log}200 \\ \text{Log}3.85 = \text{Log}C_v + n\text{Log}450 \end{array} \right.$$

Après résolution du système on obtient

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

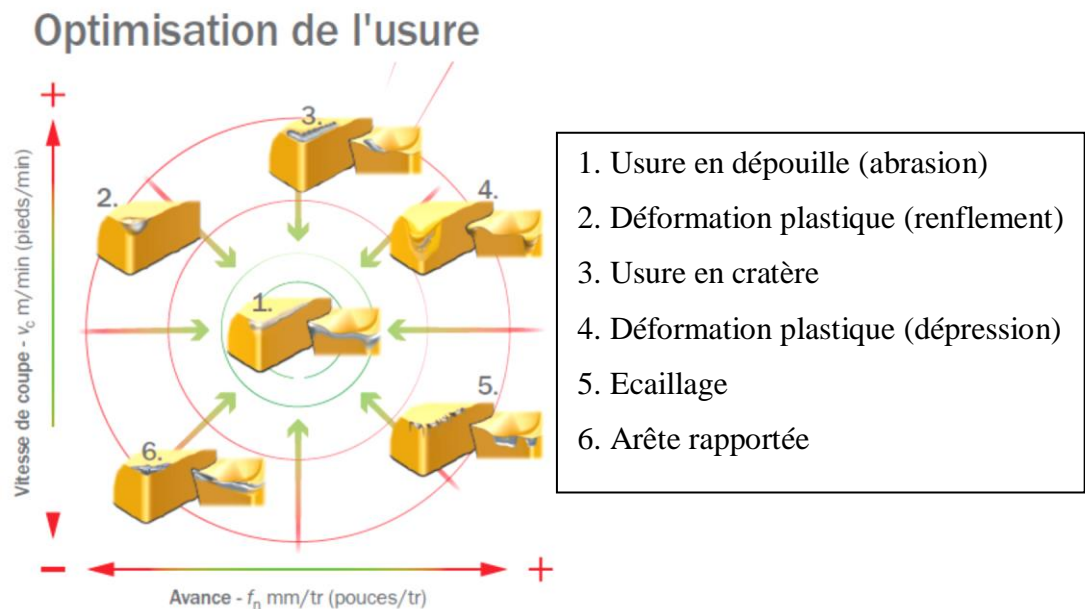
et

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

et

$$C_v = 10^{6.26}$$

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



**Figure 3.14** Usure en dépouille (abrasion) "forme d'usure préférable pour une durée de vie d'outil convenable"

## **Chapitre 4**

Actions mécaniques de la coupe

(Puissances et forces de coupe)

## Chapitre 4

### Actions mécaniques de la coupe (puissances et forces de coupe)

#### 4.1 Efforts et puissance de coupe

L'évaluation des efforts de coupe permet :

- de dimensionner les outils et les porte-pièce,
- de déterminer les appuis du montage, en opposition à ces efforts,
- d'évaluer la puissance de coupe afin de choisir la machine-outil.

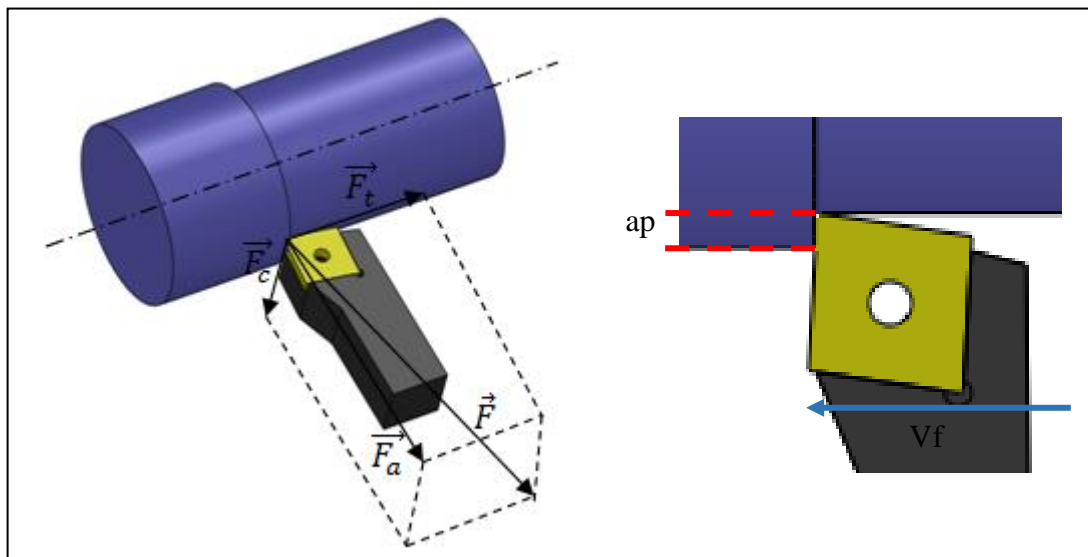
L'effort de coupe  $\vec{F}$  exercé par la pièce sur l'outil se décompose en trois forces. La plus importante est l'effort tangentiel de coupe :  $\vec{F}_c$

$$F_c = K_c \cdot ap \cdot f$$

$K_c$  : coefficient spécifique de coupe en daN/mm<sup>2</sup>

$ap$  : profondeur de passe en mm.

$f$  : avance en mm/tr.



**Figure 4.1** Schématisation des actions de coupe lors d'une opération de chariotage

$F$  = effort de coupe exercé par la pièce sur l'outil.

$F_c$  = composante tangentielle de l'effort de coupe.

$F_a$  = composante radiale de l'effort de coupe.

$F_t$  = composante liée à l'avance.

$V_f$  = vitesse d'avance.

Ces modèles sont principalement basés sur des relations tirées de la mécanique, la science des matériaux ou la physique. Leur complexité varie selon l'échelle du problème modélisé, ce qui leur confère un degré de précision variable. S'ils sont destinés en premier lieu à la prédiction des efforts de coupe, ils produisent également souvent des variables intermédiaires telles que des contraintes, déformations, etc. Si le sens physique de ces modèles est mis en avant, ils ne sont généralement pas exempts d'un minimum d'empirisme ou de résultats statistiques nécessaires à la modélisation du procédé multi-physique qu'est l'usinage des métaux.

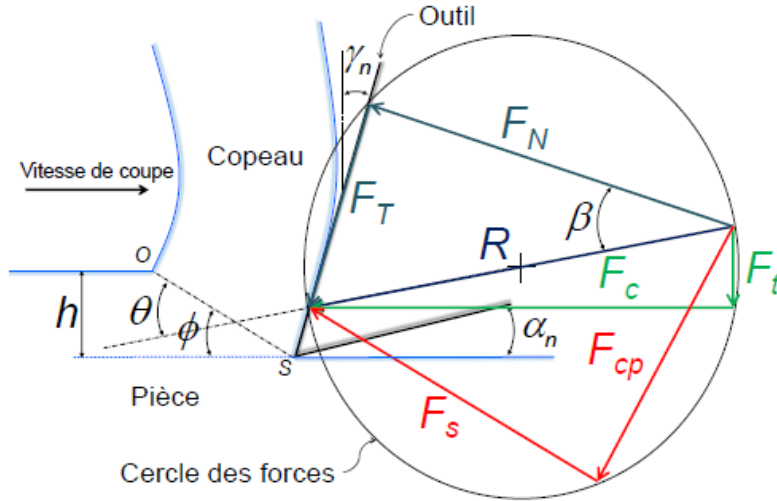
#### **4.2 Cisaillement primaire et lignes de glissement**

Le travail pionnier réalisé par Merchant (MERCHANT, 1944) présente un modèle de coupe orthogonale pour un matériau homogène et isotrope au comportement rigide purement plastique. Dans ce cas, le cisaillement primaire est supposé confiné dans un plan et le mouvement du copeau sur la face de coupe de l'outil est régi par un angle de frottement  $\beta$ . Cette modélisation simplifiée ne permet pas de relations permettant d'évaluer l'influence de paramètres tels que la vitesse de coupe, l'acuité d'arête ou les propriétés mécaniques du matériau usiné. En particulier, le modèle de frottement employé ne reflète pas parfaitement les conditions dans lesquelles le copeau s'écoule. La longueur portante sur la face de coupe n'est d'ailleurs pas considérée comme un paramètre régissant l'intensité des efforts puisqu'elle n'est ni mesurée, ni calculée.

Pour négliger l'effet d'indentation, la coupe orthogonale est définie pour une épaisseur coupée  $h$  importante et une acuité d'arête fine  $r_\beta$ , avec un rapport  $\frac{h}{r_\beta} \gg 1$ .

Ce modèle est habituellement présenté via le cercle des forces visible sur la figure 4.1. Le calcul de l'angle de cisaillement primaire (4.1), paramètre clef du modèle, est fonction de l'angle de coupe  $\gamma$  et de l'angle de frottement  $\beta$ . Ce dernier pouvant être déterminé par la relation (4.2) fonction de l'angle de coupe  $\gamma$  et des deux composantes d'effort  $F_t$  et  $F_r$ . La contrainte cisaillement primaire est déterminée en fonction de ces composantes d'effort, de l'angle de cisaillement primaire  $\phi$ , de l'épaisseur coupée  $h$  et de la largeur coupée  $b$  (4.3).





**Figure 4.2** Modélisation de la coupe d'après (MERCHANT, 1944).

$$\phi = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2}(\beta - \gamma_n) \quad 4.1$$

$$\mu = \tan \beta = \frac{F_c + F_t \tan \gamma_n}{F_c - F_t \tan \gamma_n} \quad 4.2$$

$$\tau = \frac{(F_c \cos \phi - F_t \sin \phi) \sin \phi}{bh} \quad 4.3$$

Ce modèle est difficilement applicable à la superfinition de par ses hypothèses simplificatrices.

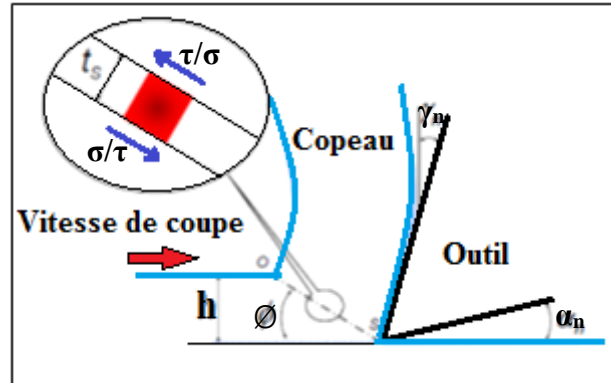
Premièrement, l'acuité d'arête est considérée parfaite ( $r_\beta = 0$ ). Deuxièmement, l'action de la face de dépouille est totalement négligée. Troisièmement, l'angle de cisaillement primaire  $\phi$  est supposé indépendant de la vitesse de coupe et de l'épaisseur coupée.

Enfin, le copeau est considéré comme formé par glissement interne plan et ne suppose pas de discontinuités de type festonnage. Le modèle de Merchant est par conséquent destiné à la modélisation de la coupe sans influence de l'acuité d'arête pour des matériaux peu élastiques et présentant une faible résistance aux frottements.

Comme le montre l'équation (4.3), les modèles analytiques modélisent souvent des paramètres tels que les contraintes et les déformations générées dans la zone de formation du copeau. La bande de cisaillement est soumise à d'importantes contraintes, déformations et vitesses de déformation. Dans la plupart des modèles, la contrainte d'écoulement du matériau usiné est supposée constante pendant le processus de cisaillement plutôt que variant avec les conditions de coupe et la géométrie de la zone de formation du copeau. Cette hypothèse a été observée expérimentalement par Shaw (Shaw, 2005) sur un large éventail de conditions de coupe.

Bitans et Brown (Bitans, 1965) ont expliqué que la zone de cisaillement a une épaisseur finie et font l'hypothèse d'un plan de cisaillement équivalent tel qu'illustré par la figure 4.2. Thomsen et al. (Thomsen, 1965) décrivent l'état de contrainte en compression et cisaillement comme constant dans le plan de cisaillement dans le cas où sa courbure est assez faible.

Dans le cas d'une courbure convexe ou concave, la contrainte de compression diminue ou augmente de la surface libre à la pointe de l'outil. Pendant le processus de cisaillement, le matériau usiné est fortement déformé ( $\varepsilon \approx 1$ ) sous un taux de déformation élevé ( $\dot{\varepsilon} = 10^5 \text{ s}^{-1}$ ) produisant une quantité de chaleur importante. La contrainte d'écoulement en cisaillement diminue à mesure que la quantité de chaleur générée est importante.



**Figure 4.3** Etat de contrainte dans la bande de cisaillement.

L'écrouissage contribue, pour sa part, à faire augmenter la contrainte d'écoulement du matériau. Les procédés expérimentaux généralement utilisés pour reproduire un tel comportement, afin d'étalonner les modèles, sont des essais de cisaillement dynamiques sur un banc de test équipé de barres d'Hopkinson. Cependant, pour les modèles décrivant les phénomènes à haute température, l'échantillon est habituellement préchauffé, cette étape étant critiquable car en usinage la chaleur est uniquement générée par le processus de cisaillement. Un certain nombre de modèles permettent de traduire le comportement d'un matériau. Le plus usité en usinage est le modèle de Norton-Hoff, basé sur l'écrouissage, pour un taux de déformation et une température fixes:

$$\bar{\sigma} = \sigma_1 \bar{\varepsilon}^n$$

où  $\bar{\sigma}$  et  $\bar{\varepsilon}$  sont, respectivement, la contrainte uniaxiale — efficace — de cisaillement et la déformation du matériau,  $\sigma_1$  est la contrainte pour une déformation  $\varepsilon = 1$  et  $n$  est l'indice d'écrouissage. Lorsque la déformation est supérieure à 1, la loi adopte un comportement linéaire tel que  $\bar{\sigma} = A + B\bar{\varepsilon}$

Les constantes A et B assurent la continuité pour  $\bar{\varepsilon} = 1$  et sont exprimées comme

$$A = (1 - n) \sigma_1$$

$$B = n \sigma_1$$

## **Chapitre 5**

Choix des conditions de coupe

## **Chapitre 5 : Choix des conditions de coupe**

Le choix des conditions de coupe est une étape très importante dans un cycle de conception mécanique afin d'assurer à la fois une bonne formation du copeau, un bon état de surface, les contraintes dimensionnelle et géométrique de la pièce ainsi qu'un maximum de durée de vie de l'outil de coupe autrement dit un maximum de pièce usinée sans changement de la plaquette d'usinage.

### **5.1 Les quatre principale variables à prendre en considération**

L'usinage est influencé par plusieurs paramètres, les principale variables à prendre en considération sont:

- 1- La vitesse de coupe  $V_c$ .
- 2- L'angle d'inclinaison  $\gamma_s$  qui peut être positif, neutre ou négatif.
- 3- La profondeur de passe  $a_p$
- 4- L'avance  $f$ .

Ces paramètres sont choisi suivant des abaques fournis par le fabricant des outils de coupe ou bien ce sont des informations qu'on peut trouver sur des revues scientifiques issu de laboratoire de recherche dans le domaine de l'usinage, ces des valeurs empirique définies après une longue série de tests et d'expériences.

#### **5.1.1 Influence de la vitesse de coupe $V_c$**

La vitesse de coupe est en fonction de la matière à usiner et est donnée par le fabricant pour obtenir une coupe optimale, à savoir qui enlève le maximum de matière pour une usure minimale de l'outil.

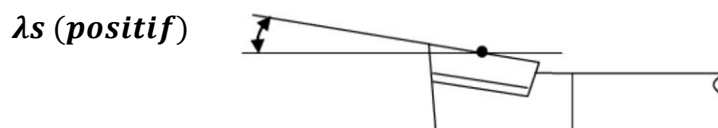
Une vitesse de coupe trop faible entraine un copeau arraché.

Une vitesse de coupe trop élevée entraine un copeau adhérent.

Une vitesse de coupe correcte entraine un copeau continu.

#### **5.1.2 Influence de l'angle d'inclinaison $\gamma_s$**

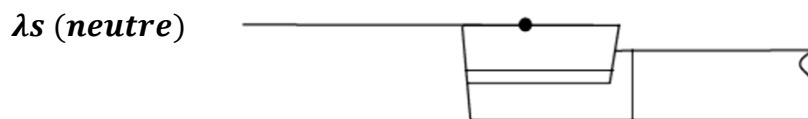
L'angle d'inclinaison  $\gamma_s$  positif est utilisé pour des matériaux « mous » comme l'aluminium, il permet d'obtenir un copeau en forme de spirale large.



L'angle d'inclinaison  $\gamma_s$  négatif est utilisé pour des matériaux « durs » ou difficile à usiner, il permet d'obtenir un copeau en forme de spirale serrée. Il faut une machine puissante et rigide pour assurer un bon usinage.



L'angle d'inclinaison  $\gamma_s$  neutre a les avantages et les inconvénients des 2 précédents mais fait office de compromis qui permet d'obtenir un copeau continu ni très large ni très serré.



### **5.1.3 Influence de la profondeur de passe $a_p$**

Une profondeur de passe trop grande entraîne un copeau arraché. Le copeau mal formé engendre un mauvais état de surface et abîme l'outil.

Une profondeur de passe trop petite ne permet pas d'obtenir un copeau, ce sera plutôt une formation de poussière qui donnera un mauvais état de surface.

Une profondeur de passe correcte entraîne un copeau continu comme voulu.

### **5.1.4 Influence de l'avance $f$**

L'avance affecte la formation du copeau à peu près de la même façon que la profondeur de passe.

Augmenter l'avance revient à augmenter la profondeur de passe car on épaissit le copeau dans les 2 cas.

L'avance est plutôt liée à l'état de surface de la pièce, il est donc préférable de jouer sur la profondeur de passe pour obtenir une bonne formation de copeau.

## **5.2 Procédure du choix des conditions de coupes**

Les variables de coupe doivent être optimales pour obtenir un copeau continu, un bon état de surface tout en préservant l'outil.

Ce choix dépend essentiellement de:

- Matériaux de l'outil de coup

- Matériaux de la pièce à usiner
- Opération à réaliser (ébauche, semi finition, finition)
- Puissance de la machine (débit du copeau que la machine peut assurer sans usure prématurée ou arrêt des organes en mouvement)
- Durée de vie de l'outil
- Avec ou sans lubrification
- Etat isostatique de la pièce (fixation de la pièce sur l'organe de fixation ou sur le montage d'usinage).

## **5.2 Influence des paramètres de coupe sur l'usure**

On peut observer deux grands groupes de paramètres dans le processus de coupe. 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 de coupe : 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 de long de l'arête tranchante et son influence reste modeste sur l'usure.
- Matériau usiné : 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 ces certains éléments d'addition).
- Lubrification : Son influence permet une amélioration de 25% sur la durée de vie.

### **5.2.1 Méthodes de mesure des endommagements**

Réduire l'usure des outils de coupe, soit par un choix optimisé des conditions de coupe, soit par la sélection du matériau d'outil le mieux adapté, soit par l'emploi d'un matériau usiné moins endommageant, répond à un double souci :

- Quantitatif : réduire le coût des pièces usinées.
- Qualitatif : obtenir des surfaces ayant des géométries et micro géométries optimales.

Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire :

-Au minimum de pouvoir faire des bilans, c'est-à-dire de pouvoir mesurer, dans des bonnes conditions de précision et de reproductibilité, les conséquences de toute action concernant le trinôme matière usinée-outil-machine.

-Au mieux d'identifier les mécanismes d'endommagement et d'en déduire des innovations.

-Quelle que soit la voie d'étude retenue, de capitaliser les résultats, de les organiser et de les utiliser en production avec l'assistance de l'outil informatique.

### **5.2.2 Méthodes d'examen et d'analyse de la surface des outils et des pièces usinées**

Ces méthodes très diverses peuvent être plus ou moins longues, coûteuses, avec des équipements d'ateliers ou de laboratoires très spécialisés. L'examen d'un outil avec une bonne loupe devrait être une pratique courante d'atelier. On peut ainsi assez souvent identifier le ou les mécanismes endommageant. De même, l'examen sommaire du copeau ne doit pas être négligé :

La micro géométrie de la surface qui a glissé sur l'outil, de la surface externe.

Leur couleur.

La dureté du copeau.

Sa fragilité.

Son épaisseur (comparée à l'avance)

Sont autant d'indications quasi gratuites. L'examen de la micro géométrie des surfaces usinées et la comparaison des paramètres de description de celle-ci au profil théorique nécessite des équipements courants de métrologie. Il peut être utile d'identifier aussi l'écrouissage superficiel et de mesurer par rayons X les contraintes résiduelles. La quantification des paramètres macroscopiques d'usure, tels que le VB sur la face  $A\alpha$  ou le KT sur la face  $A\beta$  peut être faite en atelier avec des équipements d'optique et de métrologie conventionnels.

L'identification de la nature du corps B nécessite les équipements lourds d'un laboratoire compétent en matériaux. Les analyses fines doivent être faites avec une microsonde sur des outils peu usés. La microscopie électronique à balayage permet d'examiner des outils très usés.

L'identification du corps B n'est pas toujours possible à partir de sa seule composition chimique (d'autant que selon la nature du corps A, on ne peut pas toujours faire un bilan

complet de tous les éléments utiles). Certains auteurs utilisent les rayons X pour avoir une information sur la cristallographie des phases observées.

### **5.2.3 Méthodes de mesure des efforts et des puissances de coupe**

Ces mesures sont nécessaires pour un choix optimisé des conditions de coupe valorisant les puissances installées. Elles sont précieuses pour une description mécanique du système tribologique outil-pièce-copeau.

Les mesures de puissance ne posent pas de difficultés particulières tant que les courants et tensions sont sinusoïdaux (ce qui n'est pas toujours le cas, en particulier avec des électro broches utilisant des variateurs de fréquence).

Les techniques employées pour mesurer les efforts de coupe ne doivent pas modifier la rigidité du contact outil-pièce. L'usage est quasi généralisé de n'utiliser que des capteurs contenant des quartzs piézoélectriques qui ont une excellente sensibilité, une très grande rigidité et une fréquence propre très élevée. Pour les signaux correspondant à des opérations de coupe discontinue, il est nécessaire de bien définir une politique d'échantillonnage (combien d'informations veut-on pendant une rotation de l'outil, combien d'informations peut-on stocker, quelle est la fréquence d'acquisition, etc.).

Poste d'essai d'usinabilité instrumenté : un poste d'essai d'usinage, qu'il soit en atelier ou en laboratoire, est choisi avec un très grand soin. La machine-outil utilisée doit être de conception moderne, bien entretenue et utilisée en deçà des maxima de sa puissance et de sa vitesse de broche. Des équipements de mesures physiques adaptés doivent y être installés : Mesure de puissance, capteur des composantes de l'effort de coupe, éventuellement lunette pyrométrique, accéléromètre, etc. Ces appareils sont reliés à une électronique performante (amplificateurs, filtres). Les mesures sont mémorisées sur ordinateur puis traitées, affichées sur écran et éditées sur table traçante ou imprimante. Un soin tout particulier est apporté à l'archivage des données dont le volume nécessite un stockage approprié, à l'étalonnage des appareils de mesure et à la maintenance de la machine d'essai.

Dans la coupe orthogonale l'outil exerce sur la pièce une force de coupe ou bien « Efforts de coupe ». Dans la pratique, on considère que ces efforts se repartissent suivant les deux directions principales définies par la direction de coupe et la direction d'avance. On répétera identiquement l'usinage pour que les lectures successives de flèches soient cohérentes pour le même outil, on fera varier successivement la nature de la matière façonnée sans toucher à la section du copeau, puis la section du copeau sans changer de matière



façonnée. On en déduira que les efforts varient dans le même sens que la section du copeau et la ténacité de la matière ainsi que sa résistance.

L'expérience met en évidence les trois actions de la matière sur l'outil Composante axiale  $F_a$  : de même direction que le mouvement d'avance ( $F_x$ ), elle est égale à la résistance du métal à usiner dans la direction de l'avance et des forces de frottement, sa détermination est nécessaire dans le calcul de la rigidité de l'appui du mandrin et du mécanisme des avances de la machine-outil.

Composante radiale  $F_r$  : de même direction que le mouvement de profondeur ( $F_y$ ), elle est la cause du fléchissement de l'ébauche sur le plan horizontal, diminue la pression d'usinage des ébauches longues et provoque les vibrations, non souhaitées.

Composante tangentielle  $F_t$  ; même direction que le mouvement de coupe ( $F_z$ ), elle est la principale et la plus importante. Elle est la somme des actions des forces de résistance du métal : rupture, déformation du copeau, Frottement... etc.

La force résultante  $F_r$  est :

$$F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

### **5.3 Influence des composantes de l'effort de coupe**

1-  $F_z$  : sert à dimensionner les éléments de la machine (boite des vitesses et ses composantes, broches,...), déterminer la puissance de coupe qui est nécessaire pour calculer la puissance de la machine ( $P_m = p_c / \rho$ ).

2-  $F_x$  : sert à déterminer les éléments de la boite d'avance (chariot, vis mère,...).

3-  $F_y$  : sert à calculer les éléments du bâti de la machine, notamment les glissières.

La problématique de la force de coupe réside dans l'étude des facteurs influents sur ses composantes. Les facteurs les plus en vue sont :

#### **5.3.1 Influence des propriétés mécaniques de la matière à usiner**

plus la résistance à la rupture du métal à couper est grande, plus la force de coupe devient importante (figure ci après).

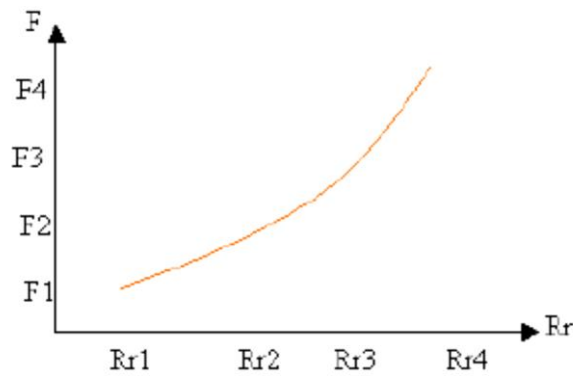


Figure 5.1 schéma de l'influence de la géométrie de l'outil

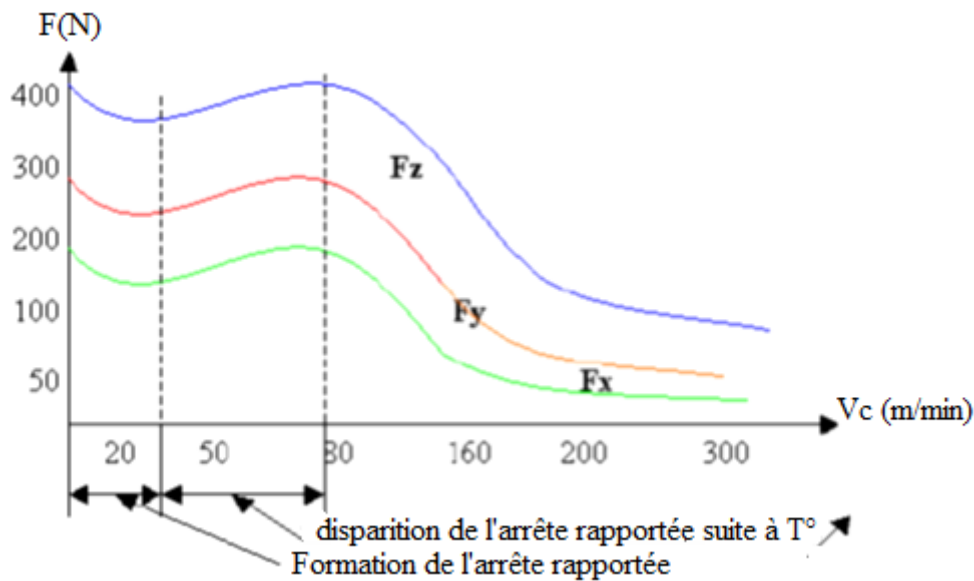


Figure 5.2 Influence de la vitesse de coupe sur les efforts

### 5.3.2 Influence de la géométrie de l'outil

L'augmentation de l'angle du tranchant  $b$  rend difficile l'engagement de l'outil dans la matière ce qui rend la déformation plastique et élastique plus difficile, cette augmentation entraîne l'accroissement de la force de coupe, surtout ses composantes  $F_x$  et  $F_y$ . L'augmentation de l'angle  $\gamma$  diminue l'effort de coupe. D'autre part, avec l'augmentation de l'angle de direction principale  $\chi_r$ ,  $F_y$  diminue,  $F_x$  augmente et  $F_z$  diminue dans l'intervalle (30 à 60°), par la suite,  $F_z$  augmente dans l'intervalle (60 à 90°).

### 5.3.3 Influence du liquide de lubrification et de refroidissement

Son utilisation en processus de coupe permet de diminuer le coefficient de frottement, d'évacuer les chaleurs, d'empêcher la formation d'arête rapportée et d'améliorer les états de

surface. Toutes ces raisons font que la force diminue considérablement sous l'action des lubrifiants (jusqu'à 25%).

**Remarque :** L'usure en surface d'attaque a très peu d'influence sur les relations entre composantes de la force de coupe. Par contre, l'usure en surface de dépouille a une influence remarquable sur les composantes horizontales  $F_x$  et  $F_y$ .

#### **5.4 Lois d'usure d'outil mesuré 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 admissibles 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  $a_p$ , 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 :

$$T = T(V, f, d) \dots \dots \dots (1-5)$$

Où

$$T = T(V, f, a_p) \dots \dots \dots (1-6)$$

Où

$$L = L(V, f, d) \dots \dots \dots (1-7)$$

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

$$V = K \cdot T^n \cdot f^p \cdot a_q \dots \dots \dots (1-8)$$

Avec  $K$  coefficient dépendant de la valeur limite du critère géométrique d'usure d'outil.

En tournage, on peut montrer que :

$$K = K_0 \cdot V_{Bm} \dots \dots \dots (1-9)$$

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  $K$ ,  $n$  et  $p$  reste de taille raisonnable.

Quand on compare entre eux 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  $a_{p0}$  ; 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,  $a_0 = 2$  mm,  $f_0 = 0,4$  mm/tr et  $VB_0 = 0,3$  mm.

### **5.5 Choix des conditions de coupe en tournage (ISO 3685)**

Tableau 1.1 choix des conditions de coupes en tournage d'après ISO 3685

Rayon de bec de l'outil 0,4 0,8 1,2

Avance  $f_0$  (mm/tr)  $< 0,32 < 0,64 < 0,95$

Profondeur de passe  $a_{p0}$  (mm)  $> 0,8 < 10 f_0 > 1,6 < 10 f_0 > 2,4 < 10 f_0$

Critères d'usure d'outil utilisés pour arrêter un essai (norme 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 :  $VB_0 = 0,3$  mm, Pas de critère de cratérisation

— Outil en carbure :  $VB_0 = 0,3$  mm,  $KT_0 = 0,06 + 0,3 f_0$  (en mm)

— Outil en céramique :  $VB_0 = 0,3$  mm, Pas de critère de cratérisation

### **5.6 Notions du couple outil/matière**

Pour qu'un outil fonctionne dans des conditions correctes, il faut que l'épaisseur de copeau générée soit comprise dans une certaine gamme.

La valeur minimale est appelée copeau minimal et notée  $h_{min}$ . Cette épaisseur minimale varie de quelques centièmes (2 à 3) jusqu'à quelques millimètres (de 1,5 à 2) et est influencée principalement par : la finesse de l'arête (valeur de la préparation d'arête différente d'un type d'outil à un autre), de la matière usinée, de la rigidité et de l'orientation de l'arête. Le fait d'usiner à grande vitesse de rotation (supérieure à 14 000 tr /mn en général) provoque un décalage de cette épaisseur minimale vers le bas.

La résistance mécanique et thermique de l'arête de coupe, la génération de vibrations par efforts de coupe trop importants impliquent la prise en compte d'une valeur maximale de l'épaisseur de copeau.

De plus, la vitesse de coupe agit directement sur le mode de formation du copeau.

Le non respect d'une vitesse de coupe minimale, notée  $V_c \min$  entraîne inévitablement la formation d'un copeau adhérent (portion du copeau qui se colle sur la face de coupe de l'outil).

Ce copeau adhérent provoque une « arête rapportée » sur l'outil générant des vibrations de coupe.

Le respect d'une durée de vie d'outil technico-économiquement viable entraîne la prise en compte d'une vitesse de coupe maximale à respecter. La dimension économique est très importante.

En ce qui concerne l'usinage à grande vitesse, la notion de couple outil/matière ne suffit plus. Plus exactement, la broche (montée sur le bâti machine) intervient d'une manière si prépondérante pour le bon déroulement de l'usinage que la notion de triplet outil/matière/environnement est couramment employée (environnement désigne ici l'environnement du couple outil matière, principalement la broche).

Il apparaît donc que le bon déroulement d'un usinage dépend de plusieurs paramètres (liés à l'outil, la matière usinée, la pièce, la machine...). La prise en compte de tous ces paramètres est indispensable dans la détermination des conditions d'utilisation d'un outil.

### **5.7 Conditions d'utilisation d'un outil**

Dans le but de déterminer les conditions optimales, Taylor le premier et depuis de nombreux expérimentateurs ont cherché à établir les lois de la coupe, en particulier la relation entre la durée de vie de l'outil et la vitesse de coupe quand sont stabilisées un certain nombre de variables : dimensions de la section du copeau, matière de la pièce et de l'outil, géométrie de ce dernier. Ils sont parvenus, pour la plupart, à des formules semblables, mais les coefficients de celles-ci présentent une dispersion importante pour plusieurs raisons :

- deux matériaux de même composition chimique et de même dureté peuvent avoir des usinabilités différentes.

- outils géométriquement différents.

- essais n'ayant pas porté sur le même champ des variables ci-dessus (en particulier vitesses de coupe).

-impossibilité d'éviter des erreurs de mesure dont l'effet cumulatif peut être important.

-durée de vie de l'outil dépendant d'autres variables méconnues telles que : état de surface des arêtes de coupe, finesse de l'arête, machines-outils elles-mêmes, mode de fixation de l'outil et de la pièce, forme et dimension de cette dernière, section d'outil, refroidissement, etc.

## ***Chapitre 6***

Modélisation analytique et numérique de la coupe

## Chapitre 6

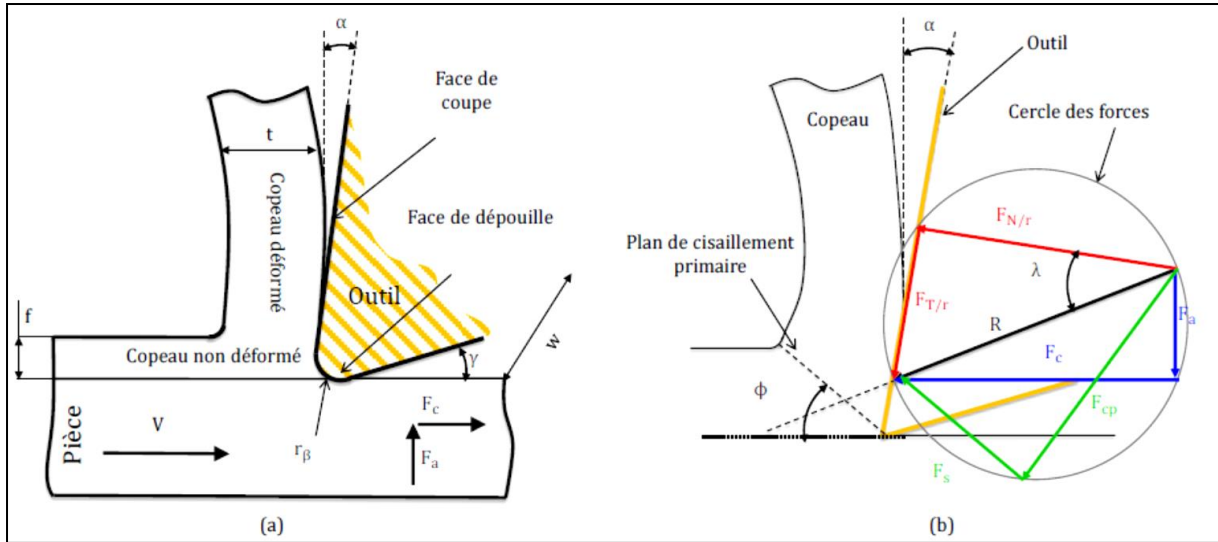
### Modélisation analytique et numérique de la coupe

#### 6.1 Introduction

L'usinage des métaux est un procédé de mise en forme par enlèvement de matière particulièrement complexe où le processus de formation du copeau met en jeu de grandes déformations plastiques, de hautes températures, de l'endommagement, du frottement dynamique, du cisaillement adiabatique, de l'usure, etc.

La description et l'analyse de ces phénomènes à la fois mécaniques, thermiques et physicochimiques se font souvent en configuration de coupe orthogonale (configuration 2D). Même si cette dernière n'est que peu rencontrée dans les applications industrielles, elle reste une opération bien maîtrisée d'un point de vue *théorique* et *expérimental*. Comme l'illustre la figure 6.1, la coupe orthogonale est caractérisée par une arête de coupe rectiligne de rayon  $r\beta$  et perpendiculaire à la vitesse de coupe  $V_c$ . Dans ces conditions, le copeau s'écoule le long de l'arête. Les paramètres en coupe orthogonale sont : l'épaisseur du copeau non déformé (ou avance)  $f$ , l'épaisseur du copeau déformé  $t$  et la largeur de coupe  $w$ . Les efforts de coupe générés pendant l'écoulement du copeau sont l'effort de coupe  $F_c$  et l'effort d'avance  $F_a$ . Les autres paramètres opératoires et géométriques sont décrits sur les figure 6.1(a) et 6.1(b).





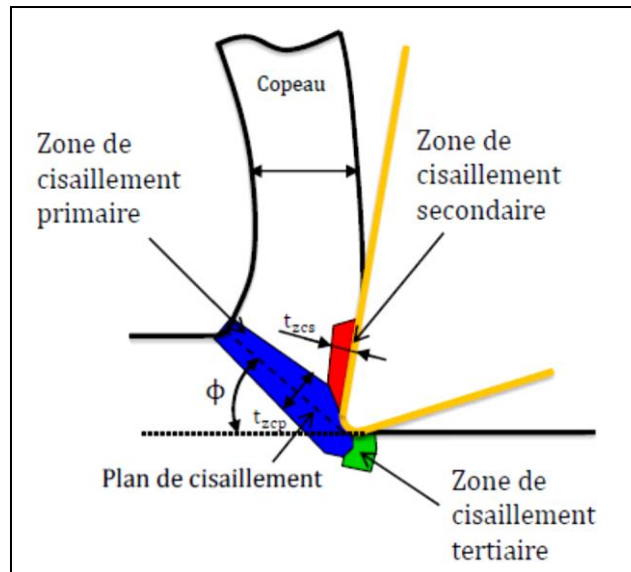
**Figure 6.1** (a) Illustration 2D de la coupe orthogonale et présentation des paramètres opératoires et géométriques. (b)- Diagramme des efforts en coupe orthogonale : l'effort de coupe  $F_c$ , l'effort d'avance  $F_a$ , l'effort normal à la face de coupe  $F_{N/r}$ , l'effort tangentiel à la face de coupe  $F_{T/r}$ , l'effort de cisaillement  $F_s$  et la résultante le long du plan du cisaillement  $F_{cp}$ .  $\lambda$  est l'angle de frottement.

Le plan de cisaillement primaire est incliné d'un angle  $\phi$  appelé angle de cisaillement primaire

$$\phi = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2}(\lambda - \alpha)$$

## 6.2 Mécanismes physiques régissant la formation du copeau

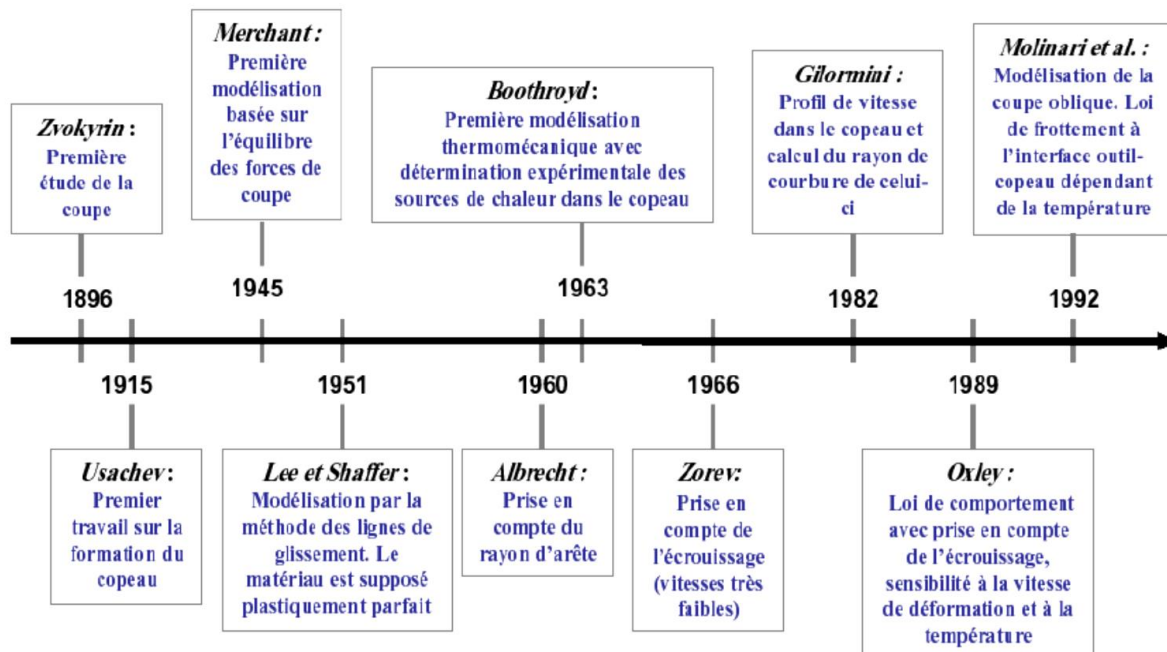
L'étude du processus et d'évacuation du copeau met habituellement en évidence 3 zones de cisaillement qui sont la zone de cisaillement primaire, notée ZCP et lieu de naissance du copeau, la zone de cisaillement secondaire notée ZCS et lieu de contact outil/copeau, et la zone de cisaillement tertiaire notée ZCT et lieu de contact outil/pièce fraîchement usinée (figure 6.2).



**Figure 6.2** Principales zones de cisaillement en usinage : Zone de Cisaillement Primaire ZCP, Zone de Cisaillement Secondaire ZCS et la Zone de Cisaillement Tertiaire ZCT.

### 6.3 Evolution des modélisations

Sur la figure suivante (figure 6.3) on illustre l'évolution de la modélisation de la coupe en usinage de la première étude de la coupe en 1896 (Zvokyrin), à la loi de frottement du modèle de Molinari et al en 1992.



**Figure 6.3** Principaux acteurs de la modélisation analytique des procédés d'usinage

Merchant (1945) s'est intéressé au procédé de coupe orthogonal stationnaire avec un copeau non segmenté. Son approche purement mécanique est basée sur l'équilibre des efforts appliqués au copeau.

Lee et Schaffer (1951) utilisent la méthode des lignes de glissement pour décrire l'écoulement du copeau à travers la bande de cisaillement, puis le long de la face de coupe. Ces auteurs suppriment ainsi l'hypothèse d'un outil suppose parfait, et intègrent le rayon d'arête. Néanmoins, la méthode des lignes de glissement impose que le matériau usiné soit parfaitement plastique.

De 1969 à 1989, Oxley propose en s'appuyant sur les travaux de Boothroyd (1963), un modèle « thermomécanique ». Il est le premier auteur à proposer une modélisation complète du procédé de coupe orthogonale. Oxley utilise un comportement thermoviscoplastique pour le matériau usiné et prend en compte à la fois les zones de cisaillement primaire et secondaire en supposant un contact collant à l'interface outil copeau.

## 6.5 Modèle de Merchant (1945)

Merchant est l'un des précurseurs de la modélisation de la coupe. Dans son modèle, la formation du copeau est supposée être due à un intense cisaillement le long d'un plan incliné d'un angle appelé « angle de cisaillement » ( $\phi$ ), par rapport à la direction de la vitesse de coupe  $V_c$  (Figure 6.4). L'auteur suppose également que l'on se place dans des conditions stationnaires en déformation plane. L'objet de l'étude est de prédire les efforts de coupe lors d'une opération simple de coupe orthogonale avec une arête droite. Le modèle est basé sur les principales hypothèses suivantes :

- (i) le matériau usiné à un comportement parfaitement plastique,
- (ii) la zone de cisaillement primaire est assimilée à un plan,
- (iii) l'interface outil-copeau est le siège d'un frottement de type Coulomb (angle de frottement  $\lambda$ ) supposé constant quelles que soient les conditions de coupe,
- (iv) le contact est supposé glissant.

En supposant, la contrainte de cisaillement  $\tau$  uniforme dans le plan de cisaillement, l'effort de cisaillement  $F_s$ , dans la zone de cisaillement primaire est donné par la relation:

$$F_s = w l_{OA} \tau = \frac{w t_l}{\sin \phi} \tau$$

Où  $w$  désigne la largeur de coupe,  $t_1$  la profondeur de coupe (ou avance) et  $l_{OA}$  la longueur de OA (Figure 2).

Les efforts de coupe sont alors calculés à partir de l'équilibre du copeau

$$\begin{aligned} N_s &= F_s \tan(\varphi + \lambda - \alpha) \\ F_p &= F_s \cos\varphi + N_s \sin\varphi \\ F_q &= -F_s \sin\varphi + N_s \cos\varphi \end{aligned}$$

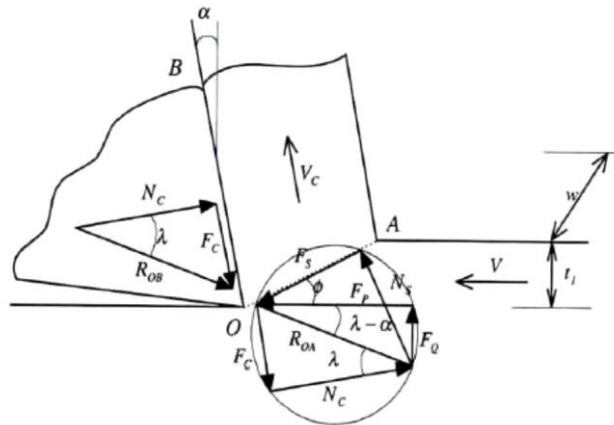
Où  $F_p$  et  $F_q$  représentent respectivement les efforts de coupe et d'avance et  $N_s$  la résultante des contraintes normales le long du plan de cisaillement OA. L'angle  $\alpha$  est l'angle de coupe (Figure 6.4).

L'angle de cisaillement  $\varphi$  est déterminé en minimisant la puissance totale  $P$  dissipée pendant la coupe :

$$P = F_p V = \tau V w t_1 \frac{\cos(\lambda - \alpha)}{\sin\varphi \cos(\varphi + \lambda - \alpha)}.$$

La recherche du minimum de  $P$ , en supposant que la contrainte de cisaillement  $\tau$  et l'angle de frottement  $\lambda$  sont constants, donne la relation :

$$\varphi = \frac{\pi}{4} + \frac{\alpha - \lambda}{2}.$$



**Figure 6.4** Approche de MERCHANT en 1945

Les relations précédentes permettent alors de donner les expressions des efforts de coupe.

$$\begin{aligned} F_p &= 2 \tau w t_1 \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\lambda - \alpha}{2}\right) \\ F_q &= 2 \tau w t_1 \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\lambda - \alpha}{2}\right) \tan(\lambda - \alpha) \end{aligned}$$

L'épaisseur du copeau est calculée en écrivant la conservation du flux de matière avec l'hypothèse que la vitesse est uniforme de part et d'autre du plan de cisaillement.

L'hypothèse du comportement parfaitement plastique induit l'uniformité de la contrainte normale le long de la face OA. En écrivant l'équilibre des moments appliqués au copeau isolé (OA étant la frontière par rapport à la pièce), Merchant détermine la longueur de contact  $l_c$  entre l'outil et le copeau :

$$l_c = \frac{t_1}{\cos \lambda} \tan \frac{\pi}{4} + \frac{\lambda - \alpha}{2}$$

#### **Limites du modèle :**

Les résultats obtenus par ce modèle montrent que les efforts de coupe sont proportionnels à la limite d'élasticité en cisaillement  $\tau$ , à la largeur de coupe  $w$ , et à l'avance  $t_1$ . Or, il a été montré expérimentalement que ceci n'est pas en accord avec la réalité. À titre d'exemple, il est possible de citer l'effet de la vitesse de coupe qui n'est pas reproduit par le modèle de Merchant.

Contrairement à ce que propose Merchant, l'écoulement de la matière ne peut se faire brusquement à travers le plan OA, mais de manière progressive.

De plus, Merchant suppose que le matériau usiné est parfaitement plastique. Ainsi, il n'y a pas de prise en compte des effets de la vitesse de déformation et de la température sur la contrainte et donc, sur les efforts de coupe.

L'auteur néglige également les effets des paramètres de coupe ( $V$ ,  $\alpha$ ,  $t_1$ ) sur les conditions de frottement. Or, de nombreuses études tribologiques ont montré que le coefficient de frottement à l'interface outil-copeau est très sensible aux conditions de coupe et à la température lors des essais.

## **6.6 Modèle d'Oxley**

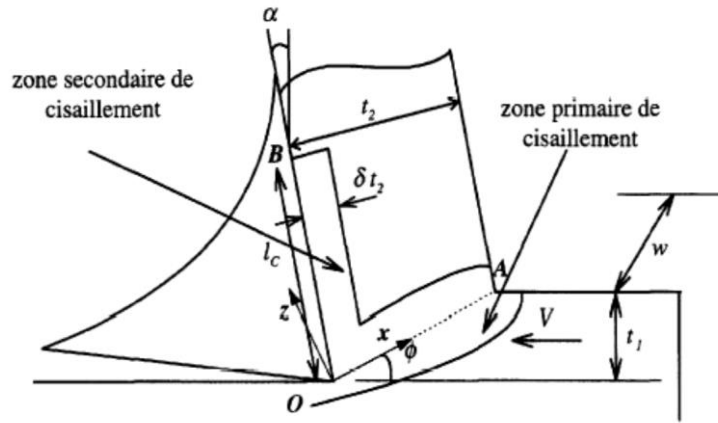
### **6.6.1 Présentation du modèle**

Oxley est le premier à présenter une approche thermomécanique de l'usinage. Le modèle donne, en fonction des conditions de coupe, les efforts et les températures moyennes dans les zones primaires et secondaires ainsi que la géométrie du copeau (longueur de contact et épaisseur du copeau).

Son modèle comprend une partie mécanique et une partie thermique issue des travaux de

Boothroyd (1963). Le modèle s'appuie sur deux observations fondamentales faites à partir de micrographies :

(i) le cisaillement primaire s'effectue dans une zone d'une certaine épaisseur,  
(ii) le copeau s'écoule le long de la face de coupe de l'outil, ce qui induit une zone de cisaillement secondaire d'épaisseur constante  $\delta t_2$  (Figure 6.5)



**Figure 6.5 Approche d'Oxley de 1989**

Les hypothèses de déformation plane et d'état stationnaire sont prises en considération et l'arête de l'outil est supposée parfaitement tranchante. Pour définir le comportement thermomécanique du matériau usiné, l'auteur s'appuie sur la loi de comportement suivante :

$$\bar{\sigma} = \sigma_1 (\dot{\bar{\epsilon}}, \theta) \bar{\epsilon}^{n(\dot{\bar{\epsilon}}, \theta)}$$

Où  $\sigma$  et  $\epsilon$  représentent respectivement la contrainte équivalente de Von Mises et la déformation plastique cumulée.  $\dot{\epsilon}$  est la vitesse de déformation équivalente associée à  $\sigma$ ,  $\theta$  représente la température absolue,  $n$  est le paramètre d'écrouissage et  $\sigma_1$  une quantité ayant la dimension d'une contrainte.

La résolution du problème revient à déterminer dans un premier temps les contraintes d'écoulement dans chacune de deux zones puis à écrire les équations d'équilibre ainsi que l'équation énergétique afin d'obtenir l'angle de cisaillement  $\phi$ , la longueur de contact outil-copeau  $l_c$  et l'épaisseur de la zone de cisaillement secondaire  $\delta t_2$ .

### 6.6.2 Points forts de la modélisation d'Oxley

Oxley est le premier auteur à proposer une modélisation thermomécanique de la coupe.

En effet, il utilise pour le matériau usiné une loi de comportement thermomécanique et prend en compte les zones de cisaillement primaire et secondaire.

Une comparaison de la modélisation à des mesures expérimentales a été faite sur deux aciers à 0.18 et 0.38% de carbone. Le modèle permet de reproduire certaines tendances expérimentales telles que la décroissance des efforts de coupe ou l'augmentation de l'angle de cisaillement avec l'augmentation de la vitesse.

### **6.6.3 Points faibles de la modélisation d'Oxley**

Le comportement du matériau a été identifié à partir d'essais de compression dynamique ( $\dot{\epsilon} = 500 \text{ s}^{-1}$ ). Les vitesses de déformation observées dans la zone de cisaillement primaire sont de l'ordre de  $10^4$  à  $10^6 \text{ s}^{-1}$ . La loi ainsi obtenue n'est donc pas valable pour ces hautes vitesses de déformation. De plus, la formation du copeau se fait principalement par cisaillement. Il aurait donc été préférable d'identifier la loi sur des essais faisant intervenir les mêmes types de déformations.

De nombreuses relations empiriques (Boothroyd, 1963), ainsi que des résultats numériques valables pour des conditions particulières de coupe (Tay et al, 1976) ont été introduites afin de déterminer la vitesse de déformation dans le plan de cisaillement ou la température dans le copeau. Des questions se posent alors sur la validité de ces hypothèses dans le cadre de nouvelles conditions de coupe, ou pour de nouveaux couples outil-matière.

De plus, le modèle ne permet pas de déterminer la distribution de température le long de la face de coupe de l'outil. Or sa connaissance permettrait, à l'aide de modèles d'usure, de prédire la durée de vie des outils en fonction des conditions de coupe.

Oxley détermine le coefficient de frottement à partir de l'estimation de la pression le long du plan OA et ce indépendamment du comportement thermomécanique du matériau usiné, des conditions de coupe ou des relations physico-chimiques à l'interface outil-copeau. Or, on peut montrer facilement que la vitesse ou la température sont des paramètres influant sur le coefficient de frottement moyen.

## **6.7 Modélisation numérique de la coupe orthogonale**

### **6.7.1 Introduction**

Les chercheurs en usinage se concentrent sur la détermination des meilleures conditions de coupe et géométrie des outils pour l'efficacité des processus. Des travaux expérimentaux sont nécessaires pour obtenir des résultats par contre ils coûtent cher et prennent beaucoup de temps. En plus de cela, des analyses simplifiées les méthodes ont des

applications limitées et ne peuvent pas être utilisées pour des processus de coupe complexe processus. À ce stade, les méthodes numériques deviennent importantes. Au cours des deux dernières décennies, la méthode des éléments finis (MEF) a été utilisée le plus souvent dans l'analyse de la coupe de métaux.

La méthode des éléments finis nous permet de prédire plusieurs paramètres de sortie de l'usinage tels que les efforts de coupe, les contraintes, les températures, la forme du copeau, etc. Sans pour autant faire des expériences.

On va présenter les aspects fondamentaux de la simulation de l'usinage par la méthode des éléments finis.

### **6.7.2 Modèle de formulation**

Il existe trois types de formulation majeure utilisée dans la simulation de l'usinage par la méthode des éléments finis : formulation Lagrangienne, formulation Eulérienne et formulation arbitraire Lagrangienne – Eulérienne.

#### **a. Formulation de Lagrange**

La formulation de Lagrange est principalement utilisée dans les problèmes de mécanique solide. Le maillage est fixé au matériau de la pièce à usiner et couvre l'ensemble de la région sous analyse, Cela est préférable lorsque le flux de matériaux sans contrainte est impliqué. La formulation de Lagrange est largement utilisée dans la simulation de la coupe pour ça Capacité à déterminer la géométrie de copeau d'une étape incipiente à un état stable et cette géométrie est fonction des paramètres de coupe, du processus de déformation plastique et des propriétés de matériel.

Par conséquent, les conditions aux limites et la forme de copeau ne doivent pas être connues a priori. En outre, les critères de séparation des copeaux peuvent être définis pour simuler des copeaux discontinus ou des fractures matérielles dans des modèles de coupe de métal qui sont basés sur la formulation Lagrangienne.

Bien qu'il existe de nombreux avantages de la formulation de Lagrange, il a également des lacunes. Le métal en cours de coupe est exposé à une déformation plastique sévère et cela provoque la distorsion des éléments. Par conséquent, une régénération de maille est nécessaire. Deuxièmement, des critères de séparation de copeau doivent être fournis. Cet inconvénient de la formulation peut être éliminé en utilisant une formulation Lagrangienne mise à jour avec une adaptation de maille ou des techniques remaillages automatiques.

#### **b. Formulation eulérienne**

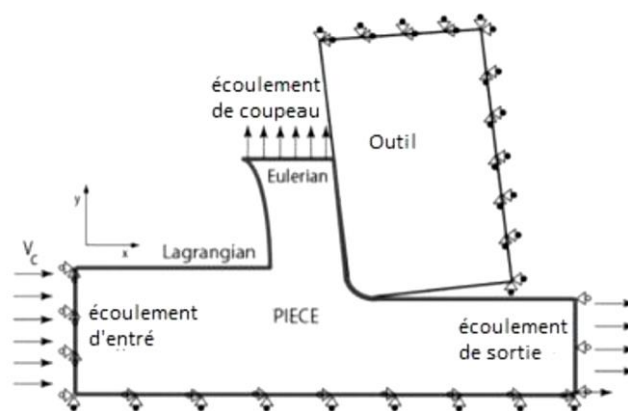


Dans la formulation eulérienne, le maillage est réparé spatialement du flux de matière qui coule à travers le volume de contrôle qui élimine la distorsion de l'élément pendant le processus. En outre, moins d'éléments nécessaires à l'analyse, réduisant ainsi temps de calcul. La coupe est simulée à partir de l'état d'équilibre et, par conséquent, il n'est pas nécessaire de critères de séparation dans les modèles à base d'Euler.

L'inconvénient de la formulation eulérienne est le besoin de déterminer les limites et la forme de copeau avant la simulation, aussi l'épaisseur des copeaux et la longueur de contact outil-copeau, en plus les conditions de contact entre l'outil et le copeau doivent être maintenues constantes au cours de l'analyse ce qui rend la formulation eulérienne ne correspond pas à la réalité du processus de déformation lors de la coupe.

### c. Formulation arbitraire Lagrangienne-Eulérienne

Les meilleures caractéristiques des formulations lagrangiennes et eulériennes ont été combinées et appelé arbitraire Lagrangian-Eulerian (ALE). Dans la formulation ALE, le maillage est ni répartis spatialement ni attachés au matériau de la pièce. Le maillage suit l'écoulement de matière et les problèmes sont résolus pour les déplacements à l'étape lagrangienne, tandis que le maillage est repositionné et le problème est résolu pour les vitesses dans l'étape Eulérienne. L'idée utilisée dans la simulation de l'usinage consiste à utiliser l'approche eulérienne pour la modélisation de la zone autour de la pointe de l'outil où se déroule le processus de coupe. Par conséquent, les distorsions des l'élément sont évitée sans utiliser le remaillage. L'approche lagrangienne est utilisée pour l'écoulement sans contrainte de matière à des limites libres. En outre, la forme de copeau se produit en fonction de la déformation plastique du matériau. Cette approche est présentée dans la figure 6.6.

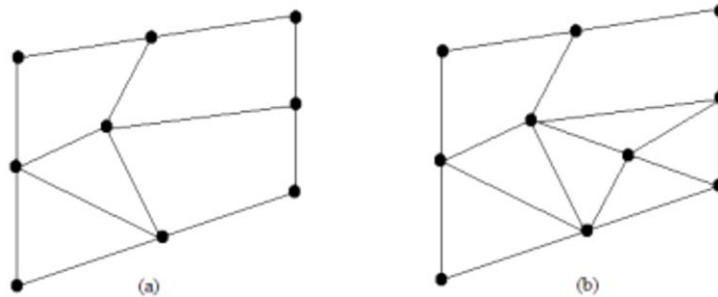


**Figure 6.6** Conditions aux limites dans la simulation (ALE)

### 6.7.3 Le maillage

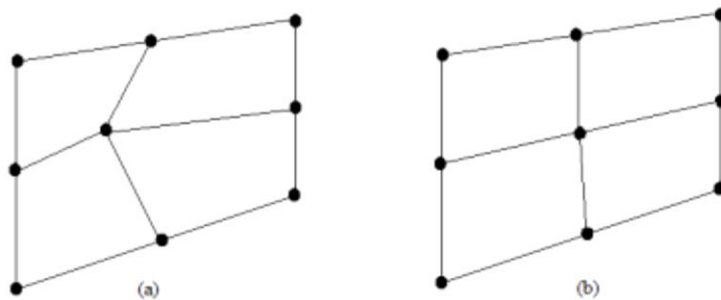
Le maillage est la procédure de diviser une région continue a des régions discontinues appelée élément. Le maillage initiale ne peut pas garder ça forme et il sera distordue à cause de la déformation plastique que subit le métal lors de l'usinage. La distorsion provoque des erreurs pendant le calcul numérique. Afin de gérer ce problème, un nouveau maillage doit être généré dans des mesure de changer la taille et la répartition des élément, c'est ce qu'on appelle un maillage adaptatif.

Le remaillage est une des procédures de maillage adaptatif, il comprend la génération d'un maillage complètement nouveau sur le maillage déformé existant. La deuxième procédure est appelée technique de raffinement qui est basée sur l'augmentation de la densité de maille locale en réduisant la taille de l'élément local comme le montre la figure 6.7.



**Figure 6.7 Raffinement (a) maillage initiale (b) réduction de la taille de l'élément**

La dernière technique de maillage adaptative est le lissage qui comprend la réaffectation des nœuds pour fournir de meilleures formes d'éléments, comme le montre la figure 6.8.



**Figure 6.8 Lissage : (a) maillage initial (b) réallocation des nœuds**

Les procédures de maillage adaptatif diminuent les erreurs pendant le calcul, donc, elle augmente la précision de la simulation, pour ces raisons, une procédure de maillage adaptatif doit être utilisée dans les simulations par éléments finis qui comprennent une déformation plastique sévère tels que la coupe de métal et la formation de copeau.

#### 6.7.4 Modèle de comportement de la pièce à usiné

L'un des sujets les plus importants dans la simulation de coupe de métal est la modélisation correcte du champ de contraintes de la pièce afin d'obtenir de vrais résultats. La contrainte d'écoulement est une limite élastique instantanée qui dépend de la déformation, de la vitesse de déformation et de la température, elle est représentée par des formes mathématiques d'équations constitutives. Entre autres, les exemples les plus utilisés dans les simulations de coupe de métal sont les modèles constitutifs des matériaux : Oxley, Johnson-Cook et Zerilli-Armstrong.

##### a. Modèle Oxley :

Oxley (1990) et ses collègues ont utilisé une loi de puissance pour représenter la contrainte d'écoulement pour l'acier au carbone.

$$\sigma = \sigma_1 \varepsilon^n$$

ou  $\sigma$  et  $\varepsilon$  sont la contrainte d'écoulement et la déformation,  $\sigma_1$  est la contrainte d'écoulement de matière à  $\varepsilon = 1.0$  et  $n$  est l'exposant de durcissement de la contrainte.

$\sigma_1$  et  $n$  dépendent de la température modifiée par la vitesse ( $T_{\text{mod}}$ ) Donnée par **Macgregor** et **Fisher**.  $T_{\text{mod}}$  est défini comme.

$$T_{\text{mod}} = T \left( 1 - v \log \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)$$

Où  $v$  et  $\varepsilon_0$  sont des constantes de matériau de la pièce usinée et elles ont des valeurs de 0,09 et 0,1 pour l'acier au carbone.

##### b. Modèle de Johnson-Cook

Johnson et Cook (1993) ont développé un modèle de contraintes basé sur la torsion et le test de barre dynamique de Hopkinson sur les larges déformations et grande températures. L'équation constitutive a été établie comme suit :

$$\sigma = \left( A + B \varepsilon^n \right) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right)$$

La première parenthèse est un terme élasto-plastique et représente un durcissement par déformation. le deuxième est le terme de viscosité et il montre que la contrainte d'écoulement du matériau augmente lorsque le matériau est exposé à des taux de contrainte élevés, le dernier terme est de ramollissement due à la température  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$  et  $m$  sont des constantes

matérielles trouvées par des tests de matériaux.  $T$  est la température instantanée,  $T_r$  est la température ambiante et  $T_m$  est la température de fusion du matériau donné.

Le modèle de Johnson-Cook suppose que la contrainte d'écoulement est affectée indépendamment par la déformation, le taux de déformation et la température.

## 6.8 Logiciel commercial

Les chercheurs ont généralement écrit leurs propres codes éléments finis pour des processus spécifiques tels que l'analyse de coupe de métal jusqu'au milieu des années 1990. Au cours des dernières années, des modules éléments finis commerciaux tels que Deform 2D / 3D, Abaqus, Advantedge, Ls-Dyna et etc. ont été utilisés de manière excessive dans le monde académique et industriel pour l'analyse de processus.

Le choix du logiciel FE pour l'analyse du découpage des métaux est très importante pour la qualité des résultats. C'est parce que les différents modules éléments finis commerciaux ont des capacités différentes et des techniques de résolution différentes.

Deform (Design Environment for Forming) est un système basé sur les éléments finis qui peut être appliqué à plusieurs processus de fabrication tels que le forgeage, le laminage et l'usinage.

Deform dispose d'un module d'usinage spécifique pour configurer rapidement les opérations de tournage, fraisage, perçage et forage, la géométrie des pièces d'outils et les conditions de coupe doivent être fournies par l'utilisateur. En outre, le logiciel permet à l'utilisateur d'ajuster des variables de modélisation spécifiques telles que la taille du maillage, les conditions aux limites et les conditions d'interface des pièces d'outils. Le programme comprend une bibliothèque de matériaux comprenant différents types d'acier, super alliage, aluminium, titane. De nouveaux matériaux peuvent être créés en utilisant des modèles de matériaux.

**a. Abaqus** est un programme d'analyse par éléments finis qui peut être utilisé pour divers problèmes tels que la coupe des métaux, Abaqus n'a pas de module pour des processus de formage spécifiques. Par conséquent, l'utilisateur doit définir les géométries des outils et des pièces de travail, les conditions de coupe, la technique de résolution, les conditions aux limites et la taille des mailles, ce programme n'a pas de bibliothèque de documents, mais il permet aux utilisateurs de configurer des matériaux en utilisant divers modèles. L'avantage important de l'utilisation de ce logiciel est de modéliser un système à haut niveau de détail.

Cependant, la configuration d'une analyse nécessite beaucoup de temps et l'utilisateur doit être expérimenté.

**b. Advantedge** : a été développé pour les opérations d'usinage par enlèvement de matière telles que le tournage, le fraisage, le forage. Le logiciel possède des interfaces d'entrée simples pour fournir des pièces de travail et des géométries d'outils ainsi que les conditions de coupe. Advantedge dispose également d'une vaste bibliothèque de matériaux. Le contrôle de l'utilisateur sur les entrées de solveur et de matériau n'est pas autorisé dans ce programme.

**c. Ls-Dyna** : est un programme d'éléments finis explicite et implicite utilisé pour l'analyse de sécurité et de crash, les problèmes d'usinage. Ls-Dyna peut être utilisé pour des simulations de l'usinage par enlèvement de matière, cependant, ce programme n'inclut pas le module d'usinage et il consomme beaucoup de temps pour modéliser les opérations de coupe de métal. En plus de cela, Ls-Dyna n'a pas l'habileté de faire le remaillage de l'outil et de la zone de contact de la pièce de travail ce qui affecte les résultats dans les simulations de coupe de métal.

## Références bibliographiques

## Bibliographie

- A. Koplev, A. L. (1983). A. Koplev, A. Lystrup, « The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP ». *composites* 14, pp. 371-376, 1983. *Composites*, 371-376.
- A. MOUFKI, A. D. (2002). Thermomecaical modeling of cutting and experimental validation. *A. MOUFKI, A. DEVILLEZ, D. DUDZINSKI, and A. MOLINARI. Thermomecaical modeling of cutting aIn Kluwer Academic Publishers, editor, Metal Cutting and High Speed Machining*, 51-67.
- BIERLA, A. (2009). 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*.
- Bitans, K. B. (1965). An investigation of the deformation in orthogonal. *International Journal of Machine Tool Design and Research* 5, 155–165.
- BOURDET, P. (2004). Coupe des métaux. *Ecole normale supérieure de Cachan – France*.
- C. GRUESCU, F. D. (2015). *Préparation de production en productique mécanique - étude de fabrication et analyse d'usinage (3PM-EFAU)*. France: Université Lille 1.
- CHERIF, M. (2003). *M. CHERIF, Modélisation générique des efforts de coupe en fraisage pour la CFAO et la surveillance de l'usinage*. Nantes, France: Thèse de doctorat, Ecole centrale.
- DARGNAT, F. (2006). *Modélisation semi-analytique par approche énergétique du procédé de perçage de matériaux monolithiques*. Université Bordeaux 1, France: Thèse de Doctorat en Mécanique.
- Dietrich, R. G. (2004). *Précis de méthodes d'usinage : méthodologie, production et normalisation*. NATHAN - AFNOR.
- GERMAIN, D. (2011). *Développement d'un modèle d'efforts de coupe intégrant le contact en dépouille : application au tournage de superfinition du cuivre Cu-c2*. France: Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, ParisTech.
- HABAK, M. (2006). *Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage de l'acier a roulement 100Cr6*. France: Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers,.
- J. L. BATTAGLIA, H. E. (2002). Modélisation du comportement thermique d'un outil de fraisage : approche par identification de système non entier. *C. R. Mécanique Vol. 330*, 857-864.

- J. P Davim, P. R. (2005). Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments. *Journal of Materials Processing Technology Vol160*, 160-167.
- L. CERCE, F. P. (2012). Spatial cutting tool wear evaluation. *journal of production engineering, N° 2, Vol 15, 2012., N°2, Vol 15.*
- L. M P Durao, D. G. (2010). Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. *Composite Structures Vol 92*, 1545-1550.
- Mallock, A. (1881). The action of cutting tools. *Proceedings of the Royal Society of London*, 127.
- MERCHANT, M. (1944). Basic mechanics of the metal cutting process. *Applied Physics*, 267-275.
- MOHAMMAD, R. (2011). *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.* France: Thèse de Doctorat de l'université Toulouse III, Paul Sabatier.
- NOUARI, M. (2000). *Modélisation de l'usure par diffusion des outils de coupe en usinage à grande vitesse.* France: Thèse de Doctorat de l'Université de Metz.
- Oxley PLB, W. M. (1963). Calculating the shear angle in orthogonal metal cutting from fundamental stress, strain, strain-rate properties of the workpiece material. *Oxley PLB, Welsh MJM 1963 Calculating the shear angle in orthogonal metal cutting from fundamental stress, strain, strain-rate properti* *Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Tool Design and Research*, 73-86.
- PASSERONCE. (2007). *Tournage.* Technique de l'ingénieur.
- RAJENDRAN, R. (2000). Theory of metal Cutting / Thermal aspects of Machining, Tool materials, Tool wear Cutting fluids and Machinability. *Federal institute of science and technology – Kerala – Inde.*
- Ramulu, M. (1997). Machining and surface integrity of fibre reinforced plastic composites. *Sadhana*, 449-472.
- S. BENSADA, C. d.-B.-A. (2000). *Coupe des métaux.* Université Mohamed Khider: Biskra –Algérie.
- Shaw, M. (2005). Metal Cutting Principles. . *Oxford university press edition.*
- Sheikh-Ahmed, J. (2009). Machining of polymer composites. *ed. Springer.*



- SONGMENE, V. (2008). Techniques avancées de mise en forme: Usinage I /SYS-849.  
*Institut de technologie supérieur, Université du Québec – Canada.*
- T. Chung chen, C. W. (1997). Prediction of the location of delamination in the drilling of composite laminates. *Journal of Materials Processing Technologie, Vol 70*, 185-198.
- Taylor, F. (1907). On the art of cutting Metals. *New York, The American Society of Mechanical Engineers* 28, 31-350.
- Thomsen, E. Y. (1965). Mechanics of plastic deformation in metal processing. *Macmillan, Collier-Macmillan (New York, Toronto).*
- Tresca, M. (1878). On further applications of the flow of solids. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1-196*, 301–345.