

CHAPITRE I

THEORIE DE LA COUPE DES METAUX

I.1. Introduction

Le choix d'un matériau et d'une nuance de coupe est un facteur important pour la réussite d'une opération d'usinage. Pour effectuer un bon choix pour une application donnée, il convient d'avoir une connaissance de base des propriétés des matériaux de coupe et de leurs performances.

I.2. Définition

Les matériaux de coupe sont des composants élaborés et utilisés pour des outils de coupe destinés à l'usinage mécanique.

I.3. Différents matériaux de coupe

I.3. 1. Acier au tungstène (dit acier rapide)

Les aciers rapides sont élaborés à partir d'un alliage fer-carbone (au minimum 0.7 %) subissant un traitement thermique. Le tungstène est le premier élément d'addition principal utilisé (jusqu'à 20 %) et quelques éléments d'addition (cobalt, manganèse, chrome, vanadium, molybdène).

La dureté de ces aciers après la trempe varie entre (60 HRC à 70HRC) et sera maintenue jusqu'à 550 °C. Les vitesses de coupe des matériaux en aciers à coupe rapide sont trois fois plus grandes que celle des matériaux en acier au carbone. 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. Ils sont principalement utilisés pour la fabrication d'outils monobloc (outils de tournage, forets, fraises et alésoirs).

Les désignations des aciers à coupe rapide sont :

- Acier Rapide Ordinaire : A.R.O;
- Acier Rapide Supérieur : A.R.S (ou HSS en anglais : High Speed Steel) ;

- Acier Rapide Extra Supérieur : A.R.E.S.

La composition chimique des aciers à coupe rapide est illustrée dans le tableau I.1:

ACIER	% C	% W	% Cr	% V	% Mo	% Co
A.R.O	0,7	1,5	4	1,5	0,75	/
A.R.S	0,8	6,5	4	2	6,5	/
A.R.E.S	0,8	20	5	2	2	10

Tableau I.1: Composition chimique des aciers à coupe rapide.

I.3. 2. Carbures métalliques

Un carbure est un composé chimique du carbone avec un deuxième élément chimique comme le carbure de tungstène et le carbure de titane, de tantale ou le niobium .

L'outil en carbures est le plus utilisé actuellement. Il existe de toutes formes pour chaque type de matériau et pour chaque type d'usinage. Il se présente comme une plaquette (figure I.1) que l'on fixe rapidement sur un porte outil.

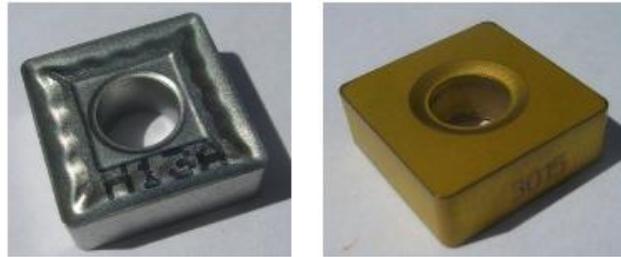


Figure I.1 : Plaquettes en carbure.

Le cobalt (ou nickel) servant de liant dans la composition du carbure est réalisé sous forme de plaquette grâce à la métallurgie des poudres par un procédé de frittage (un procédé de fabrication de pièces consistant à chauffer une poudre sans la mener jusqu'à la fusion). Sous l'effet de la chaleur, les grains se soudent entre eux, ce qui forme la cohésion de la pièce.. L'ajout du carbure de titane 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, et élément donne aussi à l'outil une durée de vie supérieure à celle des outils en AR ou ARS. La dureté des outils en carbure est de l'ordre de 80 à 90 HRC ce qui permet des vitesses de coupe très élevées : 4 fois celles des aciers rapides . Les outils à base de carbure métallique peuvent être classé en trois catégories :

- Carbure de tungstène (mono-carbure) ; composé principalement de grains de carbure de tungstène aggloméré par du cobalt : 8 % de Co et 92 % WC.

- Carbure de titane-tungstène (carbure double) : 30 % de TiC ; 4 % Co ; 66 % WC
- Carbure de titane – tantale - tungstène (carbure triple) : 30 % de TiC et TaC ; 12 % Co ; reste 58 % WC.

Les mono-carbures sont efficaces pour l'usinage de la fonte et des alliages non ferreux comparativement aux carbures doubles et triples qui sont efficaces principalement pour l'usinage des aciers.

I.3. 3. Céramiques

Ce sont des composés d'oxyde d'alumine très durs, de Nitrure de silicium, agglomérés dans des oxydes de chrome Cr₂O₃ comme liant, frittés à 1 800 °C. Les céramiques ont une résistance à la compression suffisante (jusqu'à 5000 N/mm²), une grande dureté (89 HRC à 95 HRC), avec une stabilité thermique élevée (1200°C) et une résistance à l'usure remarquable. Les outils céramiques sont hautement réfractaires (point de fusion supérieur à 1500 °C). Ils conviennent bien pour l'usinage à grande vitesse et l'usinage des alliages ferreux très durs jusqu'à 790 HV. Les plaquettes de céramiques présentent plusieurs arêtes de coupe à usage successif. La figure 24 montre deux plaquettes en céramique.



Figure I.2 : Plaquettes en céramique.

I.3. 4. Cermets

Le cermet est un terme formé de : Cer vient de céramique et met de métal. Les cermets sont des matériaux élaborés par la métallurgie des poudres, constitués par des particules de composés métalliques durs (carbures, nitrures, carbonitrures) liées par un métal (généralement du nickel). Leurs duretés sont de l'ordre de 1500 à 2000 HV. Ils ne perdent pas leur capacité à chaud en usinage à grande vitesse ou aux températures extrêmes allant jusqu'à 1000°C. Les cermets ne nécessitent pas obligatoirement de lubrification, ils sont destinés pour les opérations de finition et l'usinage de précision qui sollicitent un travail à grandes vitesses de coupe et à faibles avances.

La figure I.3 présente deux plaquettes en cermet.

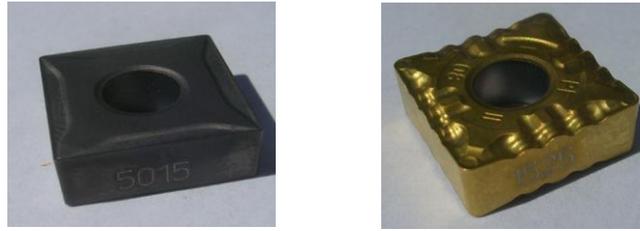


Figure I.3 : Plaquettes en cermet.

I.3. 5. Diamants

Le diamant est un minéral rare, d'origine naturelle, composé de carbone. Il est la substance naturelle la plus dure connue (7000 HV).

Il a un faible coefficient de frottement et une faible aptitude à l'adhésion (collage, soudage aux métaux). Une tenue à la chaleur élevée, une résistance à l'usure importante.

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

Il est très fragile. Son coût est élevé. Il résiste à chaud pour une température de 1500 °C. Il exige des machines-outils rapides.

Les principales propriétés mécaniques ténacité (ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure) et la dureté pour les outils de coupes sont représentées dans la figure I.4.

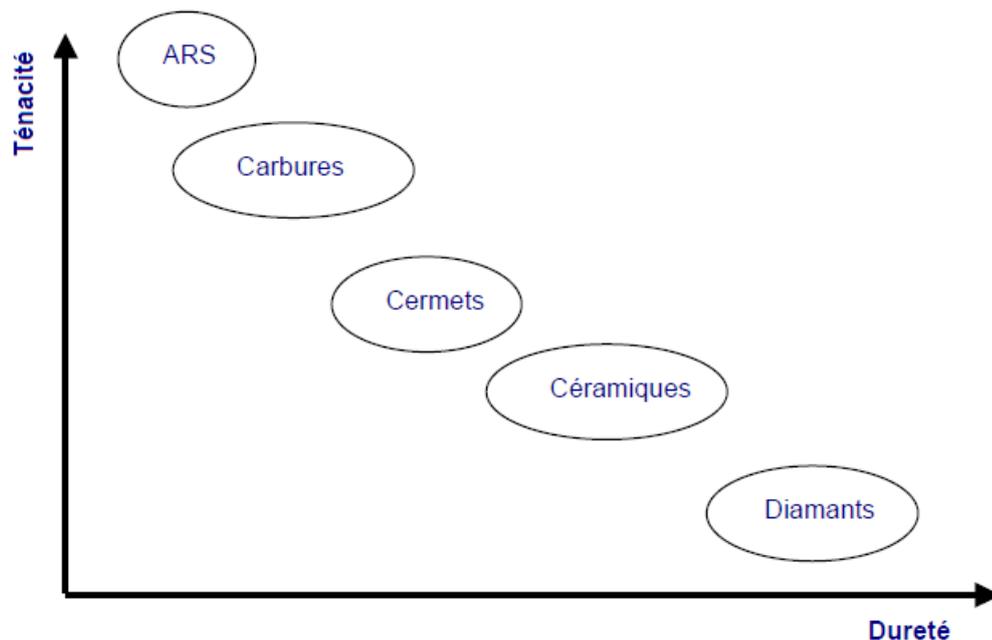


Figure I.4 : Dureté et ténacité des matériaux de coupe.

I.4. Géométrie des outils de coupe

I.4.1. Généralités

Un outil coupant est constitué d'un corps d'outil comportant une ou plusieurs parties actives. Chaque dent des outils à tranchants multiples (fraises, forets, etc.) se comporte comme un outil élémentaire dont le modèle de référence est l'outil prismatique de tournage. L'étude de la partie active de tous les outils de coupe passe par celle de l'outil prismatique de tournage. La plaquette de coupe est la partie active dans une opération d'usinage. Les outils de coupe se caractérisent par leurs matériaux et par différents paramètres géométriques. La géométrie des outils est étudiée pour assurer une formation aisée des copeaux, offrir une arête de coupe robuste et fragmenter les copeaux en éléments d'une longueur acceptable.

I.4.2. Eléments d'un outil de coupe

Généralement, Un outil de coupe peut être caractérisé par une géométrie d'arête et une orientation dans l'espace définie par des angles de coupe normalisés.

Dans un outil de coupe on trouve les éléments suivants (voir figure I.5).

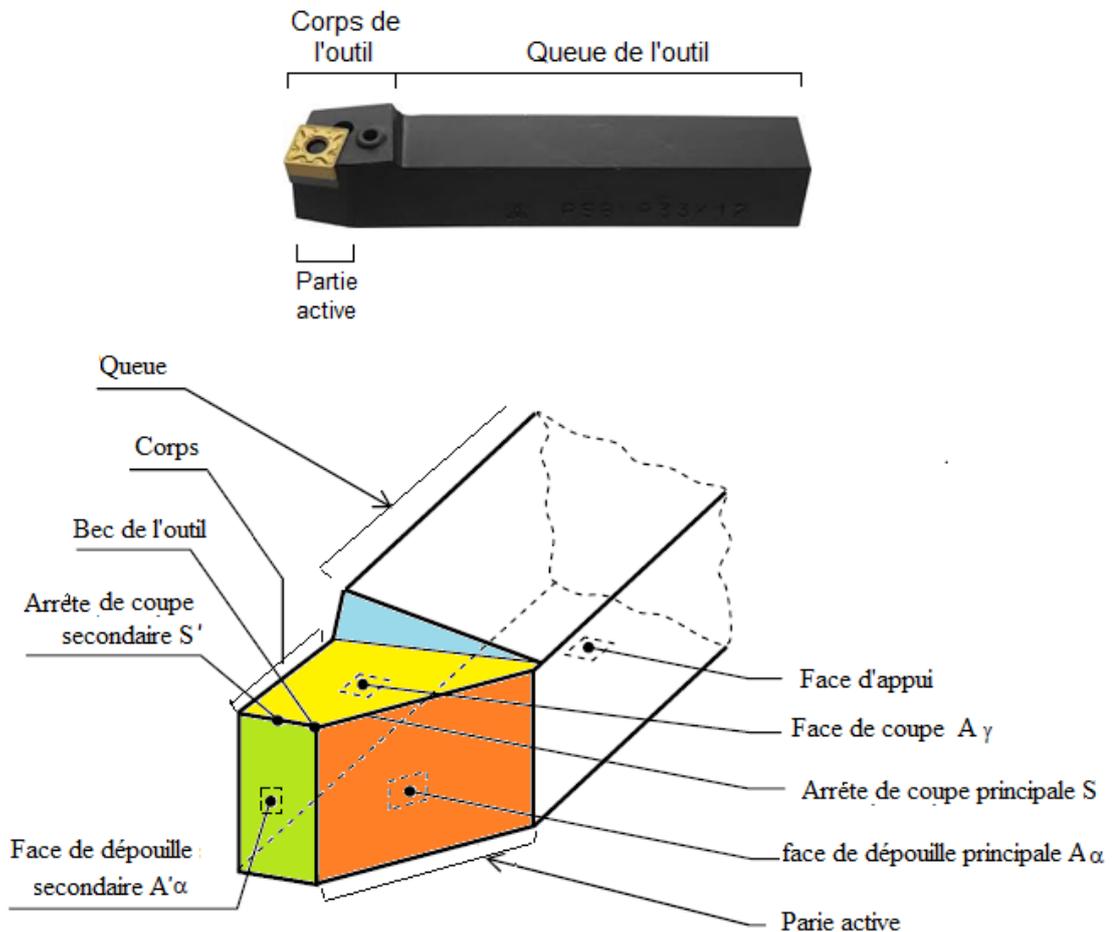


Figure I.5 : Eléments d'un outil de coupe.

I.4.2.1. Queue

Partie de l'outil qui sert à sa fixation et à sa mise en position sur la machine.

I.4.2.2. Corps d'outil

Partie de l'outil portant les éléments coupants ou les plaquettes (parfois les arêtes coupantes peuvent être taillées directement dans le corps).

I.4.2.3. Partie active

C'est la partie qui intervient directement dans l'opération de coupe. Elle est composée de la face de coupe, des faces en dépouille et des arrêtes tranchantes.

I.4.2.4. Face de coupe A_γ

C'est la surface sur laquelle glisse le copeau lors de la coupe (figure I.6).

I.4.2.5. Faces de dépouille principale A_α et secondaire A'_α

Faces devant laquelle passe la surface qui vient d'être usinée (figure I.6).

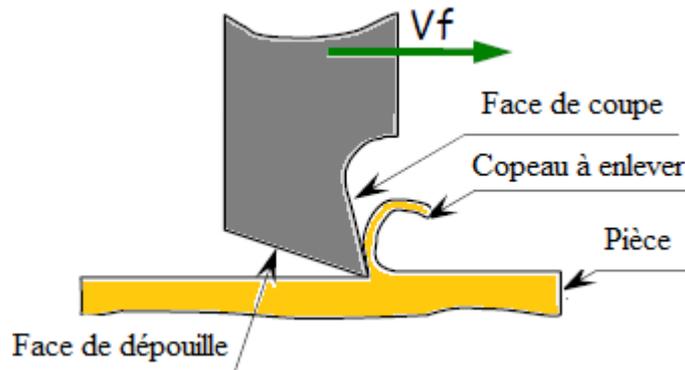


Figure I.6 : Face de coupe principale et faces de dépouille

I.4.2.6. Arrête de coupe principale S

Arrête de coupe principale est l'intersection entre la face de coupe A_γ et la face de dépouille principale A_α , destiné à l'enlèvement de la matière.

I.4.2.7. Arête de coupe secondaire S'

Intersection entre la face de coupe A_γ et la face de dépouille secondaire A'_α .

-Bec de l'outil r_ϵ (une pointe) : Jonction des arêtes principale S et secondaire S'

-Sens de l'outil

Le sens de l'outil est défini par la position de l'arrête de coupe (S). En considérant l'outil tenu en main verticalement et le bec en bas :

- l'outil est dit à droite, si, son arrête tranchante est orientée vers la droite (figure I.7a).
- l'outil est dit à gauche, si son arrête tranchante est orientée vers la gauche (figure I.7b).

- Si la partie active de l'outil est symétrique par rapport à l'axe de l'outil, ce dernier travaille indifféremment à droite et à gauche, l'outil est neutre (figure I.7c).

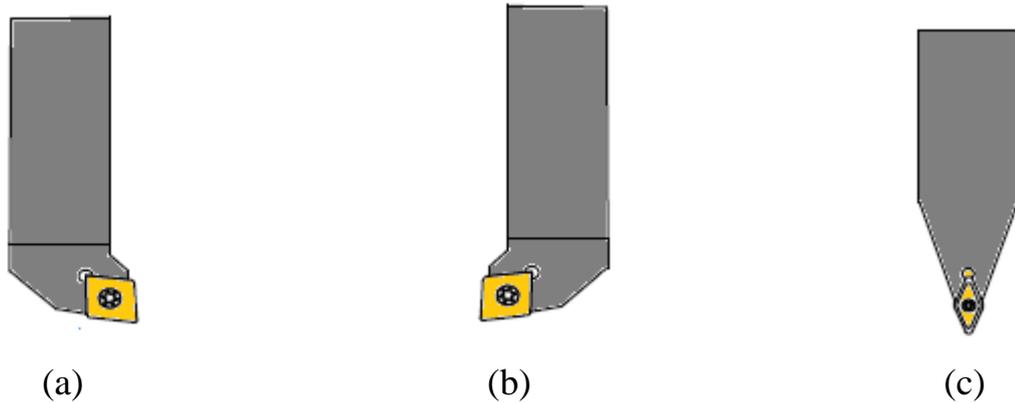


Figure I.7 : (a) Outil à plaquette en carbure droit R ; (b) Outil à plaquette en carbure gauche L ; (c) Outil à plaquette en carbure neutre.

I.4.3. Repérage des plans de l'outil

Pour pouvoir étudier les caractéristiques de l'outil, il faut représenter et définir les plans de l'outil (figure I.8).

1) P_b : plan de base, surface d'appui de l'outil.

2) M : point de l'arête de coupe.

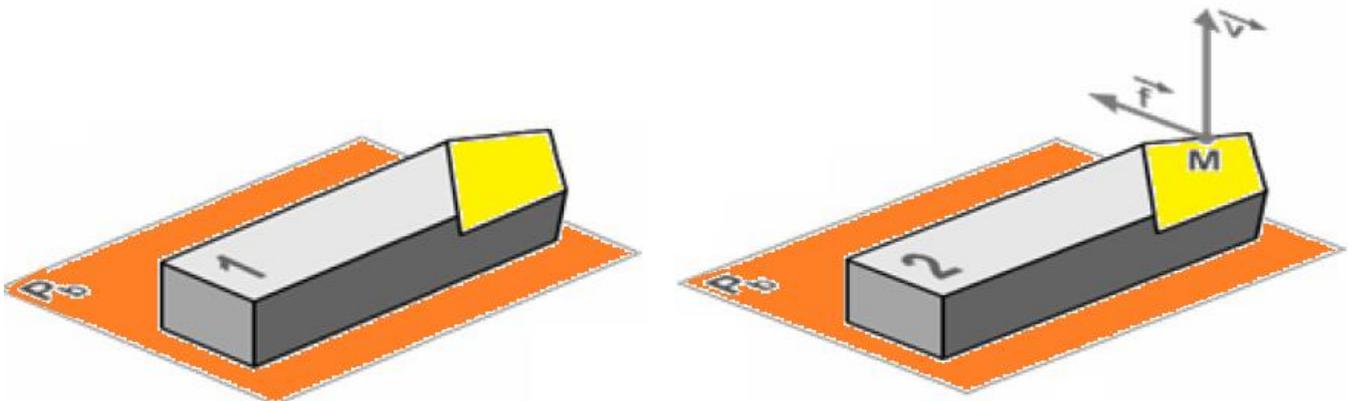
V : Vecteur suppose du sens de coupe.

f : Vecteur suppose du sens d'avance.

3) P_r : plan de référence, parallèle à P_b et contenant M et f.

4) P_f : plan de travail conventionnel, perpendiculaire à P_r et contenant M, V et f.

5) P_s : plan d'arête de l'outil, perpendiculaire à P_r et tangent à l'arête de coupe en M.



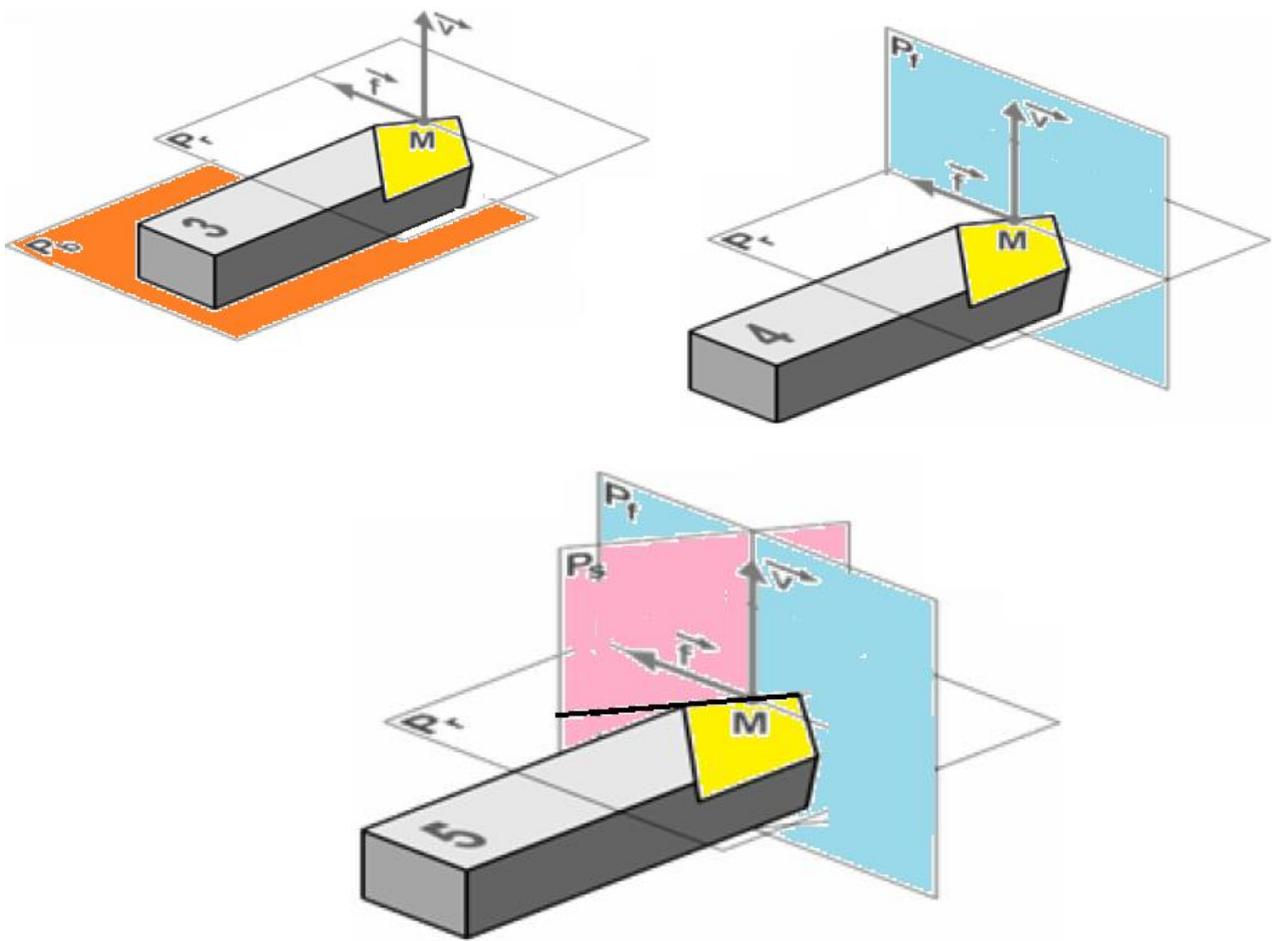


Figure I.8 : plans de l'outil.

I .4. 4. Principaux plans de la partie active de l'outil

La figure I.9 représente les différents plans de la partie active de l'outil.

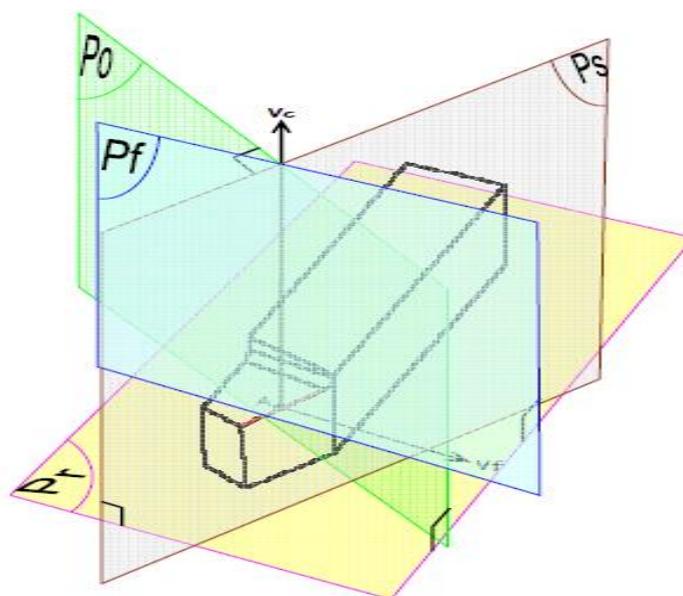


Figure I.9 : Plans de la partie active de l'outil.

I.4.5. Angles caractéristiques de l'outil de coupe

I.4.5.1. Angles d'arêtes de l'outil

Angle d'inclinaison d'arête λ_s

Angle aigu compris entre P_r et la tangente à l'arête, au point A. Il peut être positif ou négatif (figure I.9).

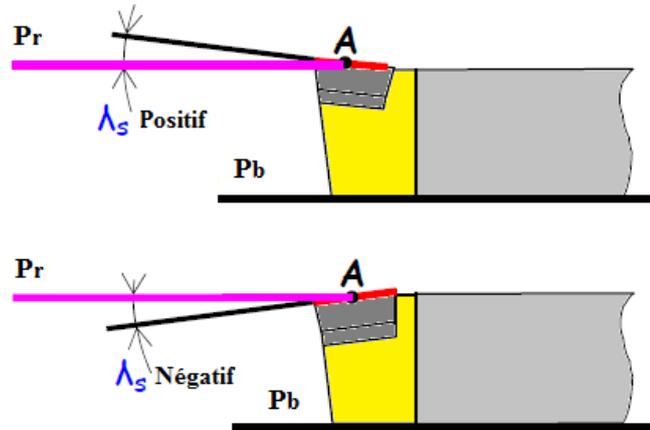


Figure I.9: Angles d'arêtes de l'outil.

Angle de direction d'arête K_r

Compris entre P_f et P_s .

Angle de pointe ϵ_r

Compris entre l'arête de coupe principale S et l'arête de coupe secondaire S'.

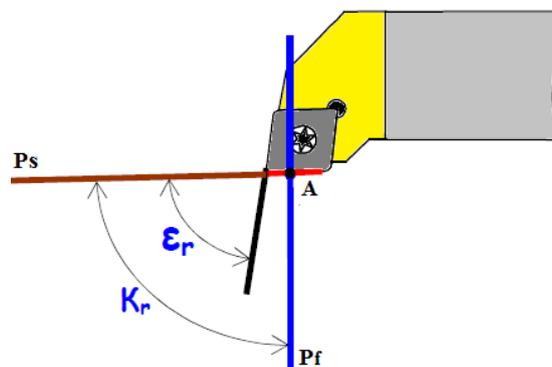


Figure I.10: Angles de direction d'arête et de pointe.

I.4.5.2. Angles des faces de l'outil

Ces angles sont schématisés sur la figure I. 11.

Angle de dépouille orthogonal α_o

Compris entre P_s et $A\alpha$.

Angle de taillant orthogonal β_o

Compris entre $A\alpha$ et $A\gamma$

Angle de coupe orthogonal γ_o

Compris entre Pr et $A\gamma$.

On que : $\alpha_o + \beta_o + \gamma_o = 90^\circ$

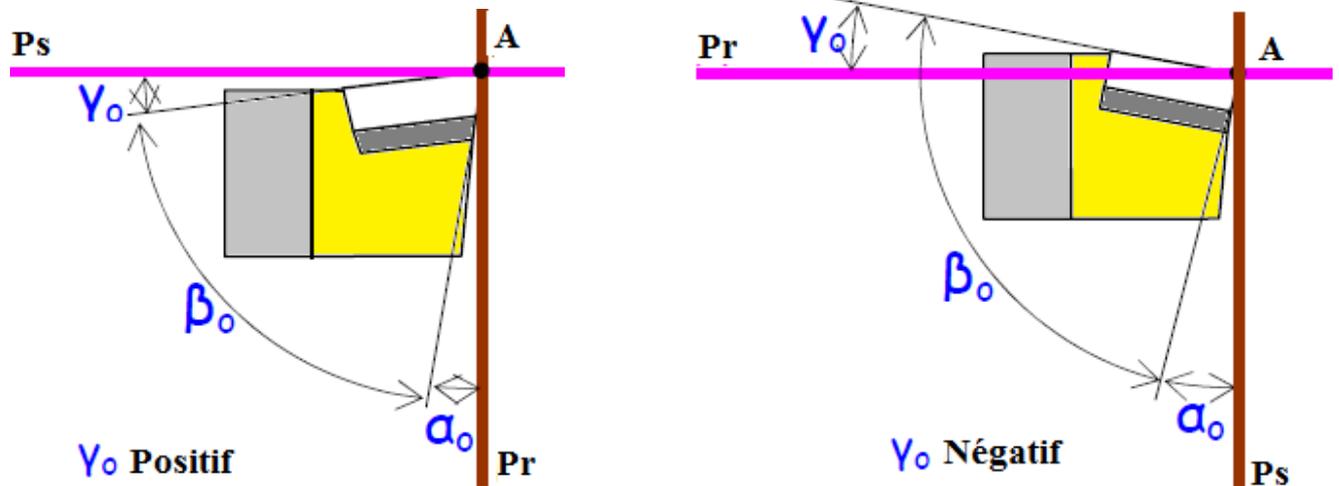


Figure I. 11 : Angles des faces de l'outil.

La figure I.12 les angles des faces pour un outil en travail.

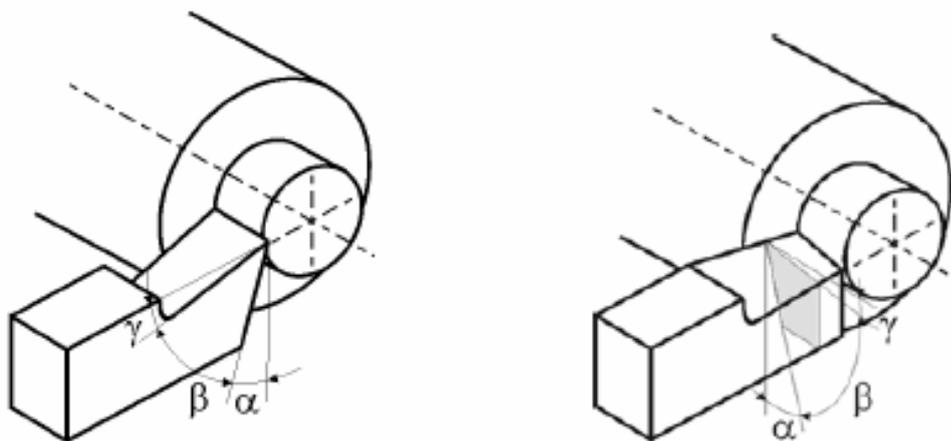


Figure I.12 : Angles des faces pour un outil en travail.

I.5. Mécanisme de formation de copeau

I.5. 1. Introduction

L'opération d'usinage est observée par la production de copeaux. 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.

I.5. 2. Formation du copeau

Le copeau se forme par déformation plastique sous des actions mécanique complexes. Un copeau est une petite chute de matière créée à la suite d'un usinage sur machine-outil d'une matière telle que le bois, le métal, le plastique, etc.

Quelle Que soit la matière usinée, le copeau produit répond aux mêmes caractéristiques qui correspondent aux trois mouvements influençant les dimensions du copeau (figure I.12) :

- Mouvement de coupe : exprimé en mètres par minute (m/min), il correspond à la longueur développée du copeau,
- Mouvement de pénétration : ou profondeur de passe, exprimé en mm, il correspond à la largeur du copeau et influe sur le réglage de la cote de la pièce,
- Mouvement d'avance : exprimé en millimètres par tour, par coup ou par dent ; il correspond à l'épaisseur du copeau.

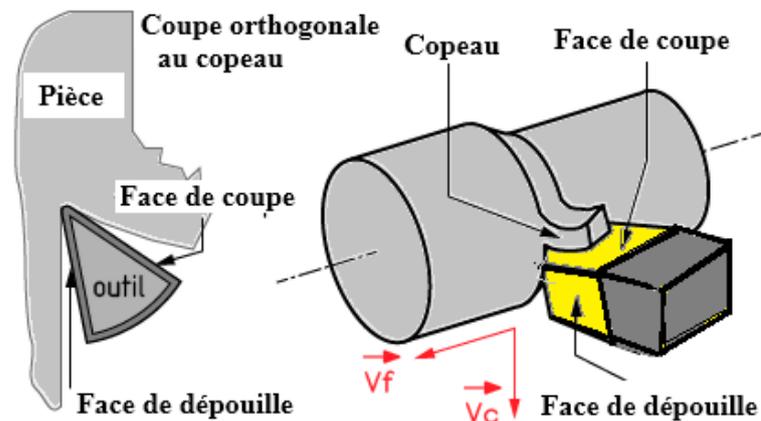


Figure I.12 : Mouvements influençant les dimensions du copeau.

I.5. 3. Notions relatives à la coupe de la matière

En précisant les éléments de coupe :

Vitesse de coupe (V_c) en mètre par minute, fréquence de rotation (n ou N) en tours par minute, profondeur de passe (p) en millimètre, vitesse d'avance (V_f) en mètre par minute et le pas d'usinage.

Fréquence de rotation (N) : Exprimée en tr/min, Cette fréquence est déterminée à partir de V_c et du diamètre d considéré sur la pièce ou l'outil

$$N = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d}$$

d : diamètre en mm de la pièce (cas de tournage) ou de l'outil (cas de fraisage)

Vitesse d'avance (V_f) : La vitesse est déterminée à partir d'une valeur d'avance de base dont l'expression varie selon le procédé d'usinage :

Tournage : (f) avance exprimée en millimètre par tour (mm/tr);

Fraisage : (f_z) avance exprimée en millimètre par tour et par dent (mm/tr/dt).

Cas de tournage :

$$V_f = f \cdot N$$

Cas de fraisage :

$$V_f = f_z \cdot N \cdot Z$$

Avec Z : le nombre de dents

I.5. 4. Profondeur de passe

Lors de l'usinage, le volume de matière enlevé dépend de l'engagement de l'outil dans la pièce. Cet engagement est appelé pénétration (p). Elle s'exprime en mm.

En chariotage, la profondeur de coupe p (mm) est la différence de rayon entre la surface non usinée et la surface usinée (c'est-à-dire la moitié de la différence entre le diamètre non usiné et le diamètre usiné). La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil.

I.5. 5. Section du copeau

La section du copeau (en mm^2) étant sensiblement un parallélogramme, sa section est égale au produit de l'avance par tour ou par coup (en mm) par la profondeur de passe (en mm).

$$s = ap$$

I.5. 6. Principaux facteurs influençant la formation du copeau

La vitesse de coupe V_c [m/min] ;

La vitesse d'avance V_f [mm/tour] ou [mm/dent/tour]

La profondeur de passe [mm]

La lubrification

La géométrie de l'outil

Les matériaux de l'outil et de la pièce

I.5. 7. Différentes formes de copeaux

La figure I.13 regroupe quelques formes de copeaux générés après l'usinage

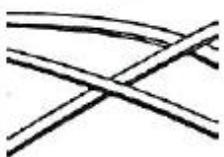
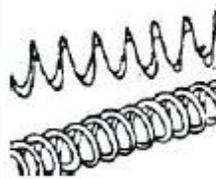
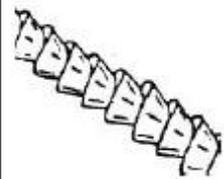
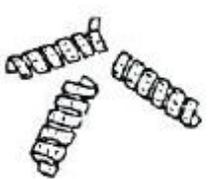
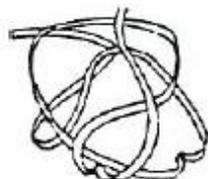
Copeau ruban	Copeau tubulaire	Copeau en spirale	Copeau hélicoïdal en rondelle	Copeau hélicoïdal conique
Long 	Long 	Plat 	Long 	Long 
Court 	Court 	Conique 	Court 	Court 
Enchevêtré 	Enchevêtré 		Enchevêtré 	Enchevêtré 

Figure I.13 : Formes de copeaux générés après l'usinage.

I.6. Efforts de coupe

I.6. 1. Introduction

La formation du copeau ne peut avoir lieu sans une force essentielle et par conséquent, une puissance de coupe P_c requise à la broche. L'étude et l'approximation des efforts de coupe sont nécessaires pour choisir les outils et dimensionner le porte pièce (le dimensionnement des montages d'usinage); leurs directions permettent de déterminer le sens de déplacement

des outils afin que les appuis du montage s'opposent à ces efforts (le contrôle du serrage de la pièce et de l'outil).

I.6. 2. Etude des efforts de coupe

Dans l'exemple d'une opération de chariotage sur tour, le copeau glisse sur la face de coupe. L'effort de coupe peut être décomposé suivant les trois directions principales (figure I.14).

- Effort tangentiel F_t (F_z) : Effort principal de coupe, dû au mouvement de coupe. C'est une composante dans le sens de la vitesse de coupe.
- Effort axial F_a (F_x) : Effort d'avance. C'est une composante dans le sens de l'avance de l'outil.
- Effort radial F_r (F_y) : effort de pénétration, composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres (en direction du mouvement de pénétration), appelée,

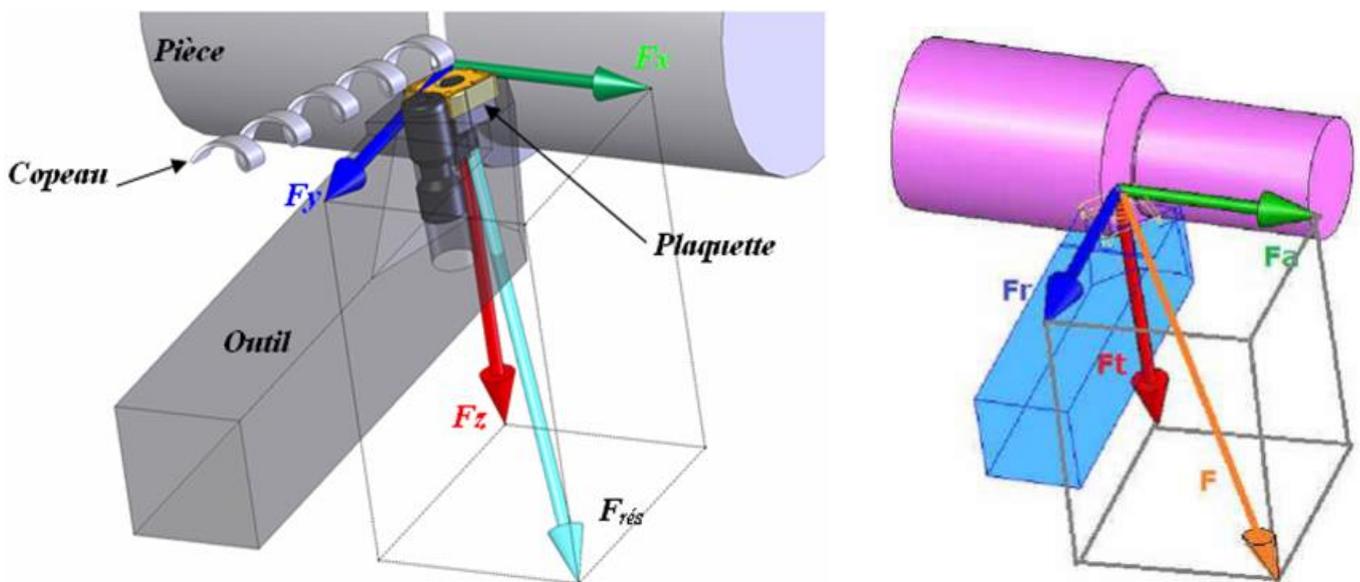


Figure I.14 : Efforts de coupe

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

$$F_a = (0,3-0,6).F_t$$

$$F_r = (0,1-0,4).F_t$$

Donc, la composante la plus importante est F_t .

La résultante peut être :

$$F = \sqrt{(0,45 \cdot Ft)^2 + (0,25 \cdot Ft)^2 + (Ft)^2}$$

$$F = 1,2 * Ft \simeq Ft$$

I. 6. 3. Calcul des efforts et puissances de coupe

I. 6. 3. 1. Efforts de coupe

L'effort de coupe s'exprime par la relation :

$$F_c = K_s \cdot S_c = K_s \cdot a \cdot f$$

F_c : Effort de coupe (en daN)

S_c : Section du copeau, $S_c = a \cdot f$ (en mm²)

a : valeur de la profondeur de passe.

f : valeur de l'avance.

K_s : Coefficient spécifique de coupe (en daN/mm²)

Le facteur K_s est déterminé expérimentalement par une série d'essais (tableau donné), il dépend essentiellement de la nature du matériau à usiner (tableau I.2).

MATÉRIAU USINÉ		Coefficient spécifique de coupe K_c (daN/mm ²)			
		Avance (mm) →			
		0,1	0,2	0,4	0,8
Aciers d'usage général	S 185 – S 275	360	260	190	140
	S 355	400	290	210	150
	E 330	420	400	220	160
	E 360	440	315	230	165
Aciers alliés	Acier au manganèse	470	340	240	180
	Acier au nickel-chrome	500	360	260	180
	Acier au chrome-molybdène	530	380	270	200
	Acier inoxydable	520	370	270	190
Aciers non alliés	C 40	320	230	170	125
	C 50	360	260	190	140
	C 60	390	290	210	150
Fontes	FGL 150	190	140	100	70
	FGL 250	290	210	150	110
	Fonte alliée	320	230	170	120
	Fonte malléable	240	170	120	90
Alliages de cuivre	Laiton	160	110	90	60
	Bronze	340	240	180	130
Alliages d'aluminium	Rr<19	110	80	60	40
	19<Rr<27	140	100	70	50
	27<Rr<37	170	120	80	60

Tableau I.2 : Quelques valeurs du coefficient spécifique de coupe.

Exemple de calcul de l'effort de coupe

Soit une opération de chariotage avec un outil couteau sur un axe en FGL150 (diamètre brut : 100 mm, diamètre usiné : 96 mm). L'usinage se fera dans les conditions suivantes :

$$V_c = 20 \text{ m/min}$$

$$f = 0,4 \text{ mm /tr}$$

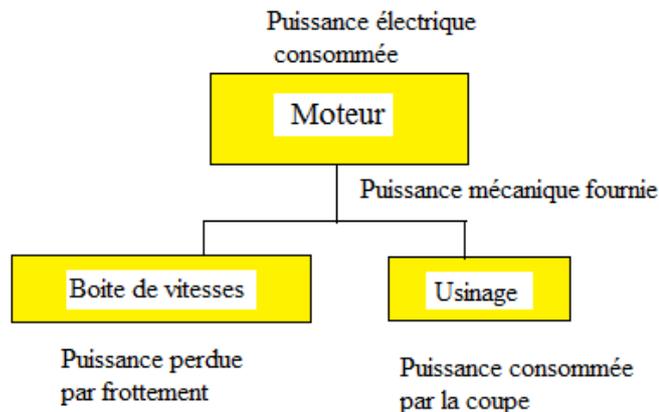
$$K_c = 100 \text{ daN/mm}^2$$

L'effort de coupe est :

$$F_c = 100 \times 2 \times 0,4 = 80 \text{ daN}$$

I. 6. 3. 2. Puissance de coupe

Elle est nécessaire à l'usinage, la puissance électrique que devra fournir le moteur est plus importante pour assurer la rotation de la broche et le déplacement du trainard pendant l'opération du tournage par exemple.



La puissance de coupe (P_c) dépend principalement de la vitesse de coupe (V_c) et de l'effort tangentiel de coupe (F_c).

$$P_c = F_c \cdot V_c / 60 \quad V_c \text{ en m/min}$$

Sur la plaque signalétique du moteur de la machine, la puissance indiquée correspond à la puissance mécanique fournie par l'arbre du moteur.

Le rendement de la chaîne cinématique de la machine η

$$\eta = \text{Puissance consommée par la coupe} / \text{Puissance mécanique fournie}$$

$$\eta < 1$$

I.7. Echauffement (Température de coupe)

La formation du copeau s'accompagne d'un important dégagement de chaleur dû au frottement du copeau glissant sur la face de coupe et au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil. La température de coupe représente une valeur moyenne du champ thermique d'une zone particulièrement sollicitée, telle que l'interface outil/copeau pour un outil. La figure I.27 représente la répartition de la température sur la partie active de l'outil lors de l'usinage à sec d'un acier avec $V_c = 60 \text{ m/min}$. le gradient de température, dans

l'outil peut atteindre les 700°C/mm. La dureté du matériau de coupe diminue à partir de certaines températures. Pour les aciers rapides : 500°C à 600°C, carbures : 800°C à 900°C Et la céramique : 1400°C

La température de la partie active de l'outil doit être réduite pour ne pas entraîner sa perte de dureté.

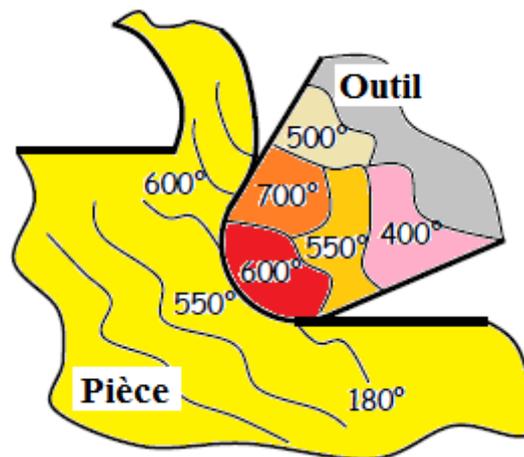


Figure I.15 : Répartition de la température sur la partie active de l'outil.

I.7. 1. Effets de la température de coupe

L'élévation de la température de coupe est nuisible pour l'outil de coupe et la pièce. Les effets néfastes sur l'outil de coupe sont :

- L'usure rapide de l'outil, ce qui réduit sa durée de vie de coupe.
- La déformation plastique des arêtes de coupe si le matériau de l'outil n'est pas assez dur.
- Endommagement des arêtes de coupe dus aux chocs thermiques.

Les effets néfastes de la température sur la pièce :

- Le manque de précision des dimensions de la pièce à cause de la plasticité du métal.
- Expansion et contraction durant et après l'usinage.
- Endommagement de la surface par oxydation, corrosion rapide, inflammation.

Exemple pratique de l'effet de la température de coupe

Chariotage d'une pièce en AL4G avec un outil de carbure sans lubrification (figure I.16). La mesure de L en cours d'usinage $\theta = 90^\circ\text{C}$ nous donne une longueur $L_1 = 200,36\text{mm}$, une autre mesure effectuée au poste de contrôle avec $\theta = 20^\circ\text{C}$ nous donne une longueur $L_2 = 200,09\text{ mm}$.

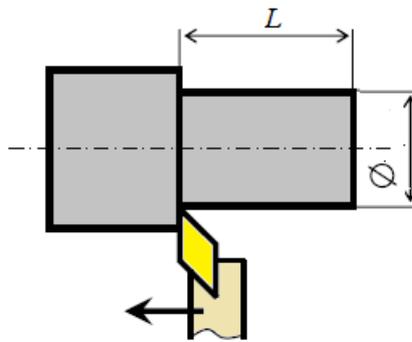


Figure I.16 : Chariotage d'une pièce en AL4G.

Après refroidissement la pièce s'est rétractée. Donc, si l'usineur n'en tient pas compte la dimension L risque d'être hors tolérance et la même remarque pour le diamètre de la pièce. Si on veut réaliser un travail de précision, il faut limiter la température de la pièce en cours d'usinage par la lubrification.

Endommagement des outils de coupe

Introduction

L'élévation de la température localisée dans les zones de formation de copeau sont la source de phénomènes physico-chimiques très complexes. Cette élévation de température est due aux frottements entre l'outil et la pièce et le contact avec les copeaux. Ces frottements agissent sur l'outil et provoquent son usure (endommagement) et par conséquent, sa dégradation rapide, réduisant ainsi le temps de son état de service (durée de vie).

Durant l'usinage (figure I.17), on constate qu'il y a :

- Frottement intense du copeau sur la face de coupe (zone1).
- Frottement de la surface usinée sur la surface de dépouille de l'outil (zone2).

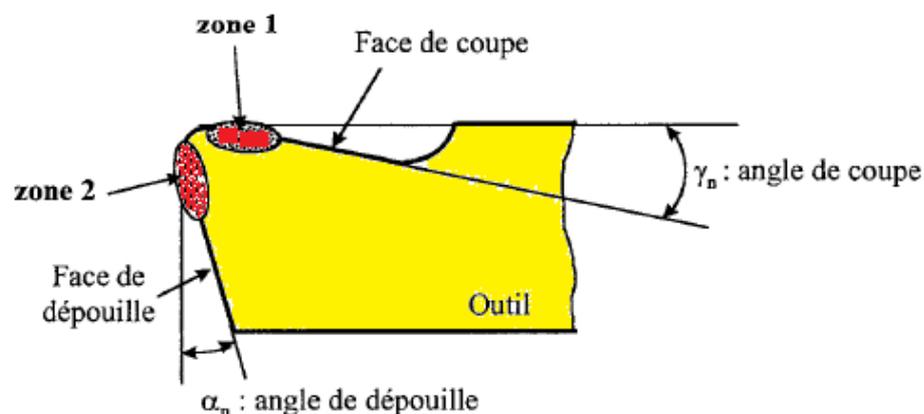


Figure I.17 : Zones de frottement de l'outil de coupe.

Définition de l'usure

L'usure des outils de coupe consiste en un transfert de métal entre les surfaces en contact (pièce, outil et copeau). Ce transfert est causé par les sollicitations mécaniques et thermiques associées à la coupe.