

Université ECHAHID Hamma Lakhdar – El-oued

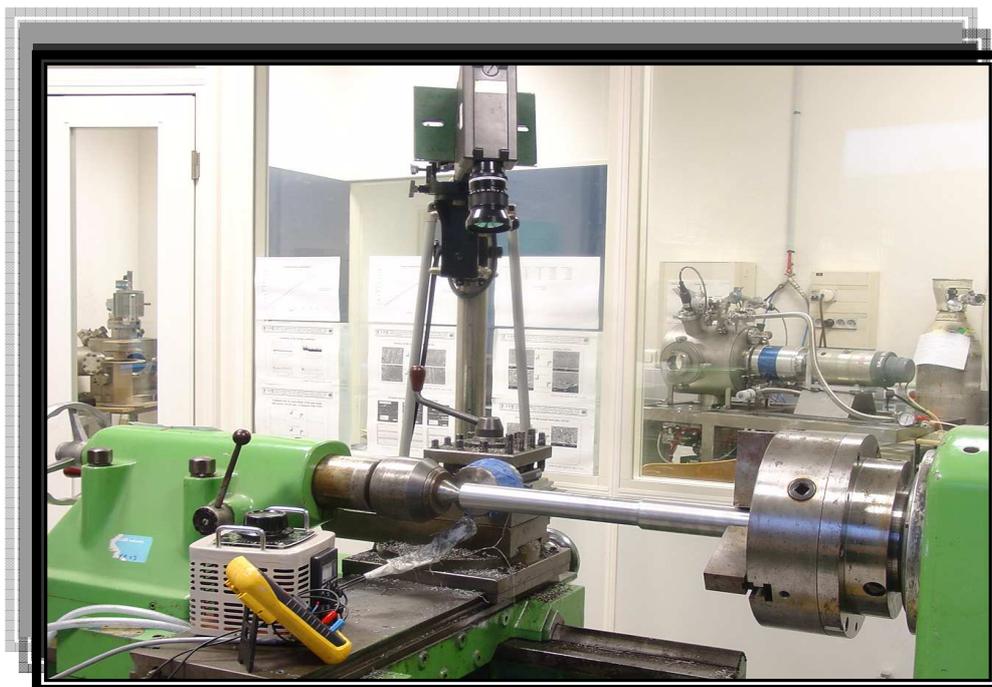
Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique



Fabrication Mécanique

Cours E-Learning



Enseignant : NECIB Djilani - MCA

Janvier 2018

SOMMAIRE

I.1. Généralités sur l'usinage par enlèvement de matière.....	5
I.1.1. Les besoins liés à l'usinage.....	5
I.1.2. Introduction.....	5
I.1.3. Travail de forme.....	7
I.1.4. Travail d'enveloppe.....	7
I.2. Matériaux à outils.....	8.
I.2.1. Aciers au carbone.....	9
I.2.2. Aciers alliés.....	9
I.2.3. Aciers rapides.....	10
I.2.4. Carbures Métalliques.....	10
I.2.5. Céramiques.....	11
I.2.6. Diamants.....	11
I.3. Les outils.....	12.
I.3.1. La géométrie de l'arête de coupe.....	12
I.3.2. Le bec d'outil.....	12
I.3.3. Les plans de l'outil.....	13
I.3.3.1. Plans de l'outil en main.....	13
I.3.3.1.1. Le plan de référence Pr.....	13
I.3.3.1.2. Le plan de l'arête Ps de l'outil.....	13
I.3.3.1.3. Le plan de travail conventionnel Pf.....	13
I.3.3.2. Plans de l'outil en travail.....	15

I.3.3.3. Angles de direction et d'inclinaison d'arête.....	16
I.3.3.4. Angles des faces.....	17
I.4. Principes physiques de la coupe des métaux.....	19
I.5. Formation du copeau et ses types.....	19
I.5.1. Echelle macroscopique.....	21
I.5.2. Echelle microscopique.....	21
1.5.3. Le copeau cisailé.....	21
1.5.4. Le copeau discontinu.....	21
1.5.5. Le copeau continu.....	22
1.5.6. Le copeau fragmenté.....	22
I.6. Efforts de coupe.....	24
I.6.1. Valeur approximative de l'effort de coupe en tournage.....	24
I.6.2. Efforts de coupe lors du perçage.....	25
I.6.3. Effort de coupe lors du fraisage.....	26
I.6.4. Puissance en travail [Pe].....	27
I.7. Tribologie des contacts copeau-outil et pièce-outil.....	28
1.7.1. Analyse du système C-O	29
I.7.1.1. Corps (1) : Copeau	29
I.7.1.2. Corps (2) : L'outil	30
1.7.1.3. Corps (3)	31
I.8. Bilan des trois types de coupe sur l'usure	32
I.9. Influence des paramètres de coupe sur l'usure	33
I.10. Usure des outils.....	34
I.11. Mécanismes d'endommagement des outils.....	35
I.11.1. Déformation plastique et fatigue (mécanique)	37

I.11.2. Usure par adhésion : arête rapportée.....	37
I.11.3. Usure par abrasion (mécanique)	39
I.11.4. Usure par fissuration (mécanique)	39
I.11.5. Usure par diffusion (physico-chimique)	40
I.11.6. Usure par oxydation (physico-chimique)	40
I.11.7. Usure avec effet de chocs.....	41
I.12. Manifestation de l'usure.....	41
I.12.1. Usure frontale.....	43
I.12.2. Usure cratère.....	43
I.12.3. Usure par déformation plastique.....	44
I.13. Usure visible sur l'outil.....	44
I.13.1. Usure par déformation plastique de l'arête.....	44
I.13.2. Usure par écaillage de l'arête.....	45
I.13.3. Usure par arête rapportée ou copeau adhérent	46
I.13.4. Usure en dépouille	47
I.13.5. Usure en cratère	47
I.14. Critères d'usure	48
I.14.1. Les critères directs	48
I.14.2. Les critères indirects	49
1.15. Procédés d'usinage	49
1.15.1. Principales machines-outils leur travail.....	50
1.15.1.1. Les machines à outil de coupe.....	50
1.15.1.1.1. Machines dont le mouvement de coupe est rectiligne.....	50
1.15.1.1.2. Machines dont le mouvement de coupe est circulaire.....	50
1.15.1.2. Les machines à outil abrasif.....	51

1.15.2. Usinage avancé.....	65
1.15.2.1. Introduction.....	65
I.15.2.2. Usinage assisté jet d'eau haute pression	65
I.15.2.3. Usinage assisté champ magnétique.....	67
I.15.2.4. Usinage assisté Laser	68
I.15.2.5. Assistance cryogénique	68
I.15.2.6. Usinage assisté par ultrasons	69
I.15.2.7. Usinage par Electroérosion	70
I.16. Usinage des matériaux composites par enlèvement des copeaux.....	71
I.17. Principales propriétés des composites impliquant des difficultés en usinage.....	71
I.18. Dégradations provoquées par la coupe	72
I.19. Outils employés pour la coupe des composites	73
I.20. Usinage des structures sandwich.....	74

I.1. Généralités sur l'usinage par enlèvement de matière.

I.1.1. Les besoins liés à l'usinage

Depuis leur apparition, les techniques d'usinage ont subi de multiples améliorations. Les procédés de mise en forme des matériaux par enlèvement de matière n'ont cessé d'être remis en question afin de rester en phase avec les exigences industrielles, quelles soient économiques ou écologiques. Aujourd'hui, l'ingénieur de fabrication se doit donc de pouvoir répondre à une multitude de questions afin de réaliser rapidement des pièces avec la qualité demandée et à moindre coût.

Par exemple, dans le cas de l'usinage :

- Quel type de machine faut-il utiliser et suffira-t-elle en terme de puissance et de précision ?
- Quelles sont les conditions de coupe à utiliser pour minimiser l'endommagement des outils ou du matériau usiné ?
- Quelles sont les solutions à adopter lors de la conception des outils et dans quels matériaux doivent-ils être fabriqués pour améliorer leur durée de vie et/ou la qualité des états de surface des pièces usinées ?
- Quelles sont les propriétés mécaniques de la pièce après usinage ?
- Est-il possible d'usiner sans apport de lubrifiant ? ...

Il y aurait encore un nombre considérable de questions, dont il est difficile d'établir une liste exhaustive. L'état d'avancement des connaissances sur le plan fondamental ne peut apporter de réponse à toutes ces questions. En revanche, la technologie et les techniques d'usinage ont permis de faire évoluer et d'optimiser la production.

I.1.2. Introduction

Usiner consiste à enlever de la matière à une pièce à l'aide d'un outil. En raison des différents types d'outils utilisés, on dénombre différents procédés d'usinage :

- La rectification, où la matière est enlevée par les grains abrasifs d'une meule ;
- L'électro-érosion où la matière est désintégrée par une électrode ;

- L'usinage par outil coupant, seul procédé traité dans la suite du présent dossier parmi les trois. L'outil est animé d'un mouvement adapté à la forme recherchée. Au contact de la pièce et de l'outil, en fonction des vitesses de déplacement, des trajectoires choisies et des duretés des matériaux, se crée un copeau provenant de la pièce usinée.

L'usinage est un procédé de génération de surfaces. Il consiste à créer une nouvelle surface par enlèvement de matière (formation des copeaux) en utilisant un outil coupant. Les caractéristiques de cette surface dépendent du couple outil-matière, c'est-à-dire des paramètres mis en jeu pendant la coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de passe.....). Tout usinage par un outil coupant se caractérise par :

- Un mouvement relatif entre la pièce et l'outil, résultant de la composition d'un mouvement de coupe (M_c) et d'un mouvement d'avance (M_f). Ces derniers sont des translations et des rotations, indépendantes ou conjuguées (mouvement hélicoïdal) par exemple ;

- La forme de la partie active de l'outil (point, ligne) ;

- Les conditions de coupe permettant d'optimiser la productivité de l'ensemble machine-outil-pièce.

En usinage, il existe plusieurs configurations utilisables selon le procédé de coupe (le fraisage, le rabotage, le tournage.....).

En tournage (Fig. I.1) le mouvement de coupe (M_c) est appliqué à la pièce avec une trajectoire circulaire et une fréquence de rotation définissant la vitesse de coupe (V_c). Le mouvement d'avance (M_f) est appliqué à l'outil avec une trajectoire coplanaire et une vitesse d'avance définie (V_f).

On distingue deux principes de génération d'une surface usinée, l'usinage en forme et l'usinage d'enveloppe, parfois utilisés de manière mixte.

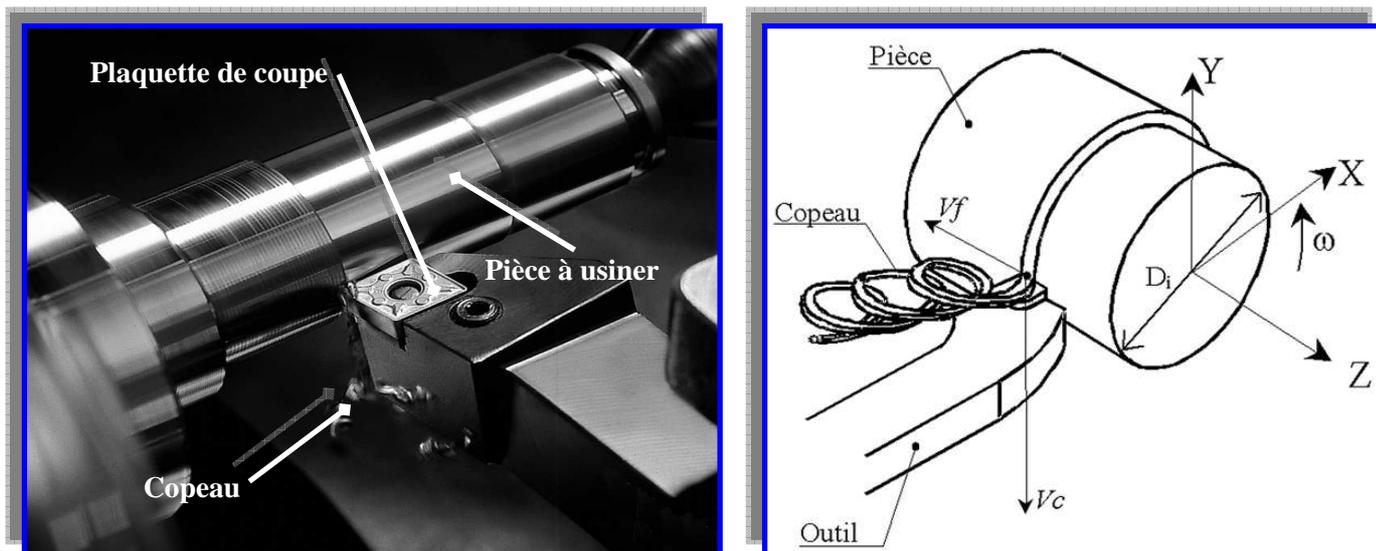


Fig. I.1. Opération de chariotage en tournage.

I.1.3. Travail de forme

Il est obtenu par le déplacement d'un outil de forme spécifique. Lors de sa rencontre avec la pièce, l'outil usine la pièce et permet d'obtenir une surface de forme directement liée à celle de l'outil. La figure I.2 montre la génération d'une gorge en tournage. Le mouvement de coupe est une rotation appliquée à la pièce. Le mouvement d'avance est une translation donnée à l'outil (mouvement de pénétration).

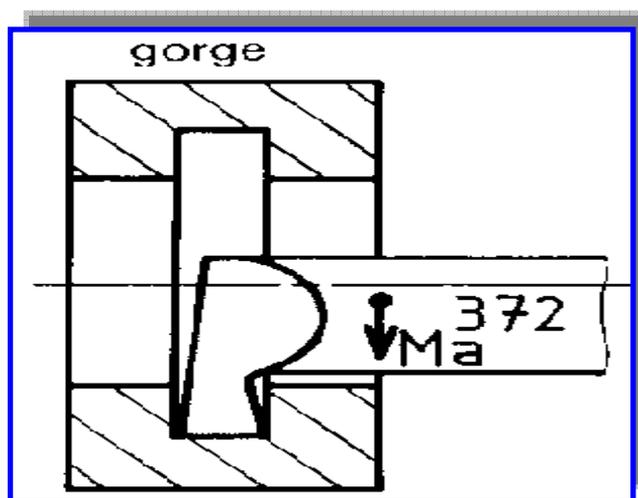


Fig. I.2. Principe du travail de forme

I.1.4. Travail d'enveloppe

La surface engendrée est définie par le déplacement d'un point, appelé point générateur. La génération d'une surface impose donc la combinaison de deux mouvements. Suivant cette

combinaison, on crée un plan, une surface de révolution ou une surface quelconque. Sur la figure I.3, le point générateur de la surface enveloppe est l'extrémité d'un outil se déplaçant parallèlement à l'axe de rotation (mouvement d'avance). La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe).

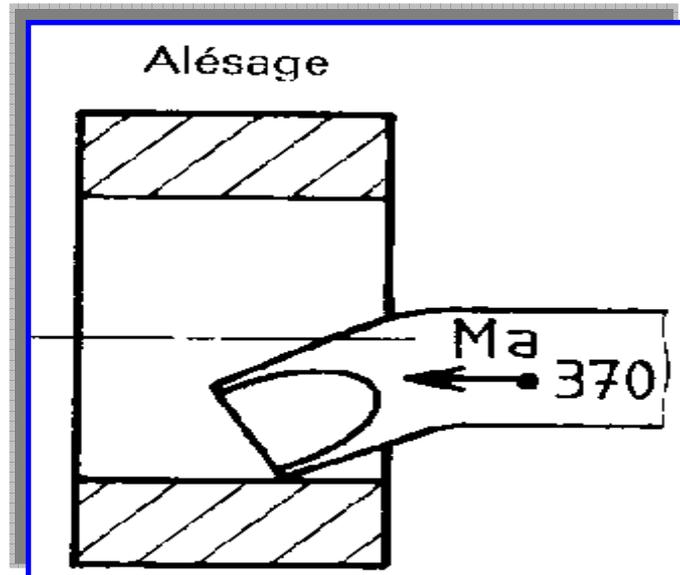


Fig. I.3. Principe du travail d'enveloppe

I.2. Matériaux à outils

Les performances des machines outils dépendent étroitement de celles des outils de coupe qu'elles actionnent et des conditions d'utilisation des outils. Pour que l'arête tranchante d'un outil de coupe reste toujours vive, elle ne doit pas s'user. De plus, la matière qui la constitue doit être plus dure que celle de la pièce à usiner. Comme la dureté d'un métal et sa résistance varient en sens inverse, on doit prendre des précautions particulières pour avoir une partie active, sur laquelle se forme les copeaux, très durs et un corps résilient et résistant à la flexion et la torsion. D'où l'idée de constituer un outil en deux parties.

- L'une (active) en matériau dur avec ou sans traitement thermique.
- L'autre (passive) sur laquelle est rapportée la partie active, soit par plaquette montée mécaniquement ou par soudobrasage, soit par soudage électrique par rapprochement, soit par sertissage.

La partie active de l'outil servant à couper la matière doit posséder les qualités suivantes:

- Résistance élevée aux sollicitations (résistance aux chocs, à la traction, compression etc....).
- Dureté élevée des faces de coupe et de dépouille (des surfaces dont l'intersection forme l'arête coupante) pour pouvoir pénétrer dans le métal usiné.
- Faible rugosité ($R_a = 1.6 \mu\text{m}$) des faces de coupe et de dépouille. Conservation de la dureté à des températures élevées (500 à 900°C) pour limiter les effets de l'usure sur les faces de coupe et de dépouille.

Une classification des matériaux par ordre de dureté croissant peut être établie comme suit:

- Acier au carbone trempé ;
- Acier au carbone allié ;
- Acier au Tungstène trempé (acier rapide) ;
- Alliages coulés (stellites) ;
- Carbures métalliques ;
- Céramique ;
- Diamant.

I.2.1. Aciers au carbone

Ces aciers ont une teneur en carbone comprise entre 0,6 et 1,3%. La dureté varie entre 58 et 63 HRC. La vitesse de coupe V_{c1} varie entre 10 et 15 m/min. Les nuances les plus utilisés sont : XC 65 ; XC 85 ; XC 95. La vitesse de coupe V_c , est une vitesse instantanée du point considéré de l'arête par rapport à la pièce. Dans le cas du mouvement circulaire, la vitesse de coupe est une fonction de la vitesse de rotation 'N' et du diamètre 'D' de l'élément en rotation.

I.2.2. Aciers alliés

Ces types d'aciers sont utilisés pour la fabrication des limes, tarauds, forêts etc. l'acier allié est obtenu par l'ajout d'éléments d'alliage (Chrome, Tungstène, Molybdène, Vanadium,.....) à l'acier au carbone. La dureté varie entre 60 et 62 HRC. La vitesse de coupe V_{c2} varie entre 1,2 et 1,4 V_{c1} [m/min]. Les nuances les plus utilisées sont : Z 35 NCD 22; 36 CD 4.

I.2.3. Aciers rapides

Ils sont obtenus avec un taux de tungstène et de chrome atteignant respectivement 8,5 à 19% et 3,5 à 4,6%. La dureté de ces aciers après la trempe varie entre 62 et 65 HRC. Les vitesses de coupe des outils en aciers à coupe rapide sont trois fois plus grandes que celle des outils en acier au carbone $V_{c3} = 3.V_{c1}$.

$V_{c3} = (100 \text{ à } 120) \text{ [m/min]}$ pour l'acier

$V_{c3} = (150 \text{ à } 180) \text{ [m/min]}$ pour la fonte

Les désignations des aciers à coupe rapide sont :

- A.R.O. : Acier Rapide Ordinaire ($T_{lim} = 400^{\circ}\text{C}$) ;
- A.R.S. : Acier Rapide Supérieur ($T_{lim} = 500^{\circ}\text{C}$) ;
- A.R.E.S. : Acier Rapide Extra Supérieur ($T_{lim} = 600^{\circ}\text{C}$) .

I.2.4. Carbures Métalliques

Les outils à base de carbure métallique peuvent être classés 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. La dureté des outils en carbure métallique dépend de la composition chimique et varie de 88 à 92 HRC. Ces matériaux, mêmes portés à 800 et 900 °C, gardent une dureté relativement élevée.

- Ces plaquettes portent des noms donnés par les fabricants tels que: Widia, Diamolyb. carboram. Ils sont classés en trois catégories symbolisées par les lettres P, M, K visualisés par les couleurs: P (bleu), M (jaune) et K (rouge).

- P01 à P40: utilisés pour les métaux ferreux à coupeaux longs (travail des aciers).
- M10 à M40: utilisés pour les métaux ferreux à coupeaux longs et courts (travail des fontes et aciers).
- K01 à K40: utilisés pour les métaux ferreux à coupeaux courts et métaux non ferreux (travail des fontes).

I.2.5. Céramiques

Les céramiques ont une résistance à la compression suffisante (jusqu'à 500 Kgf/mm²), une grande dureté (89 à 95) HRC, avec une stabilité thermique élevée (1200°C) et une résistance à l'usure remarquable.

I.2.6. Diamants

D'origine naturelle ou synthétique c'est le matériau le plus dur. Son prix d'achat élevé en limite l'utilisation. On utilise dans l'industrie des diamants généralement impropres à la bijouterie (types noirs). Le diamant se présente sous deux formes:

- Poudre collée sur un support en fonte pour les meules destinées à l'affûtage des outils des carbures.
- Grain serti ou brasé sur un corps pour les outils tranchant unique réservés à des travaux de finition. Exemple comparatif: finition d'un alésage de piston.
- Outil carbure: 2000 pièces entre deux affûtages, rugosité obtenue Ra= 1.6µm.
- Outil diamant: 5000 pièces entre deux affûtages, rugosité obtenue Ra=0.4µm

L'outil diamant trouve surtout son emploi à très grandes vitesses sur les matériaux ductiles que durs. Travail de finition du cuivre, bronze, aluminium pour obtenir un beau poli de la surface. Le diamant peut usiner tous les métaux quelque soit leur dureté

I.3. Les outils

L'outil de coupe est l'élément qui enlève la matière. Il existe une très grande variété d'outils de coupe : différents type de géométries, de matériaux et de revêtements. Dans ces travaux, une configuration d'outil simple sera développée. La partie active de l'outil fera l'objet d'une description (Fig. I.4(b)) géométrique simple, sans brise copeau sur la face de coupe, sans préparation d'arête particulière. Un outil de coupe de tournage peut être caractérisé par une géométrie d'arête et une orientation dans l'espace définie par des angles de coupe normalisés.

I.3.1. La géométrie de l'arête de coupe

Usuellement dans les modèles de coupe, la partie active de l'outil est définie par trois plans (Fig. I.4(a)) sans raccordement. En réalité, la zone de coupe de l'outil est constituée de 3 plans raccordés par deux rayons (Fig. I.4(b)) : le rayon de bec ϵ et le rayon d'acuité de l'arête de coupe, qui est souvent négligée dans un grand nombre de modèles

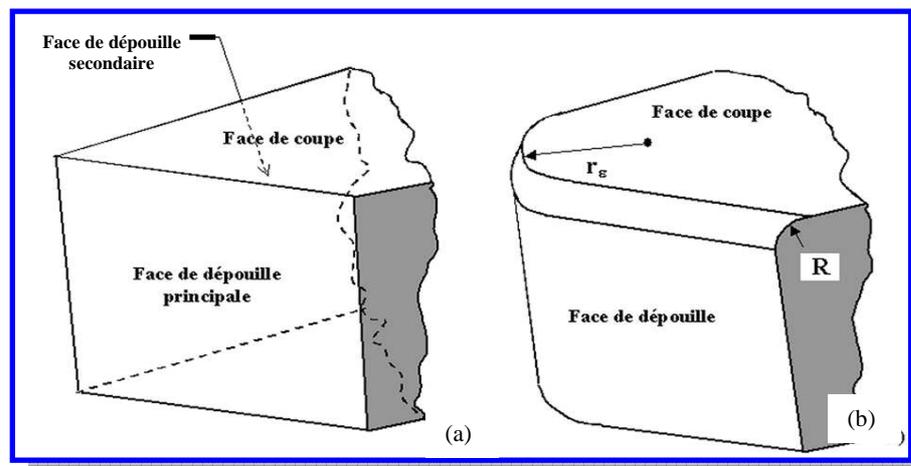


Fig. I.4. Géométrie de l'arête de coupe.

I.3.2. Le bec d'outil

C'est la partie où se rejoignent l'arête principale et l'arête secondaire. Cette partie peut être droite, arrondie, ou vive.

Les angles sont définis par référence à des plans définis dans deux référentiels :

- Système de l'outil en main : Il spécifie la géométrie de l'outil lors de sa fabrication et de son contrôle, indépendamment de son utilisation future.
- Système de l'outil en travail : Il spécifie la géométrie de l'outil lors de son utilisation.

I.3.3. Les plans de l'outil

La production des copeaux s'effectue par la combinaison de trois déplacements.

- Déplacement de coupe.
- Déplacement d'avance.
- Déplacement de profondeur.

I.3.3.1. Plans de l'outil en main

I.3.3.1.1. Le plan de référence Pr

Il est parallèle au plan de base de l'outil et passe par le point A considéré. Il est perpendiculaire au mouvement de coupe Me supposé c'est-à-dire au vecteur vitesse coupe Vc , il contient généralement le vecteur vitesse Vf .

I.3.3.1.2. Le plan de l'arête Ps de l'outil

Il contient l'arête de l'outil si elle est rectiligne, ou la tangente en A si celle-ci est curviligne: Il est perpendiculaire à Pr et contient Vc .

I.3.3.1.3. Le plan de travail conventionnel Pf

Contient le vecteur vitesse d'avance Vf et le vecteur vitesse de coupe perpendiculaire au plan de référence Pr .

Ces surfaces sont orientées dans l'espace à l'aide des plans d'outil normalisés (Fig. I.5)

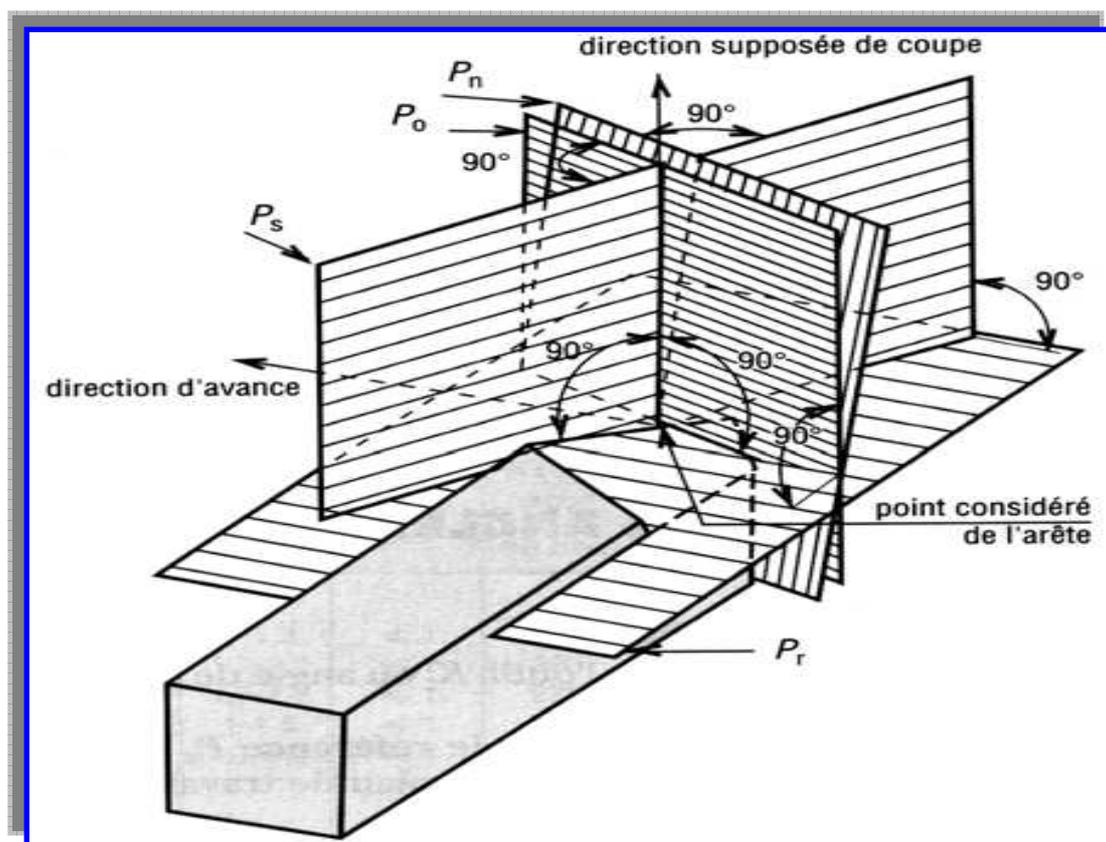


Fig. I.5. Plans d'outil en main sur un outil de chariotage d'après la norme NF E 66-503

Pour positionner la face de coupe et de dépouille, il faut définir par rapport aux plans d'outil normalisés, trois angles de coupe et deux angles d'arête (Fig. I.6). Les trois angles de coupe sont : l'angle de dépouille noté α (angle entre le plan d'arête P_s et la face de dépouille), l'angle de taillant noté β (angle entre la face de dépouille et la face de coupe) et l'angle de coupe noté γ (angle entre la face de coupe et le plan de référence P_r). Ces trois angles sont mesurés dans un plan spécifique, ils prennent alors la lettre du plan en indice (angle de dépouille mesuré dans P_n : α_n , mesuré dans P_f : α_f). Les deux angles de direction d'arête sont l'angle d'inclinaison d'arête λ_s (angle entre l'arête de coupe et le plan de référence P_r mesuré dans P_s) et l'angle de direction d'arête K_r (angle entre l'arête de coupe et le plan P_f mesuré dans P_r).

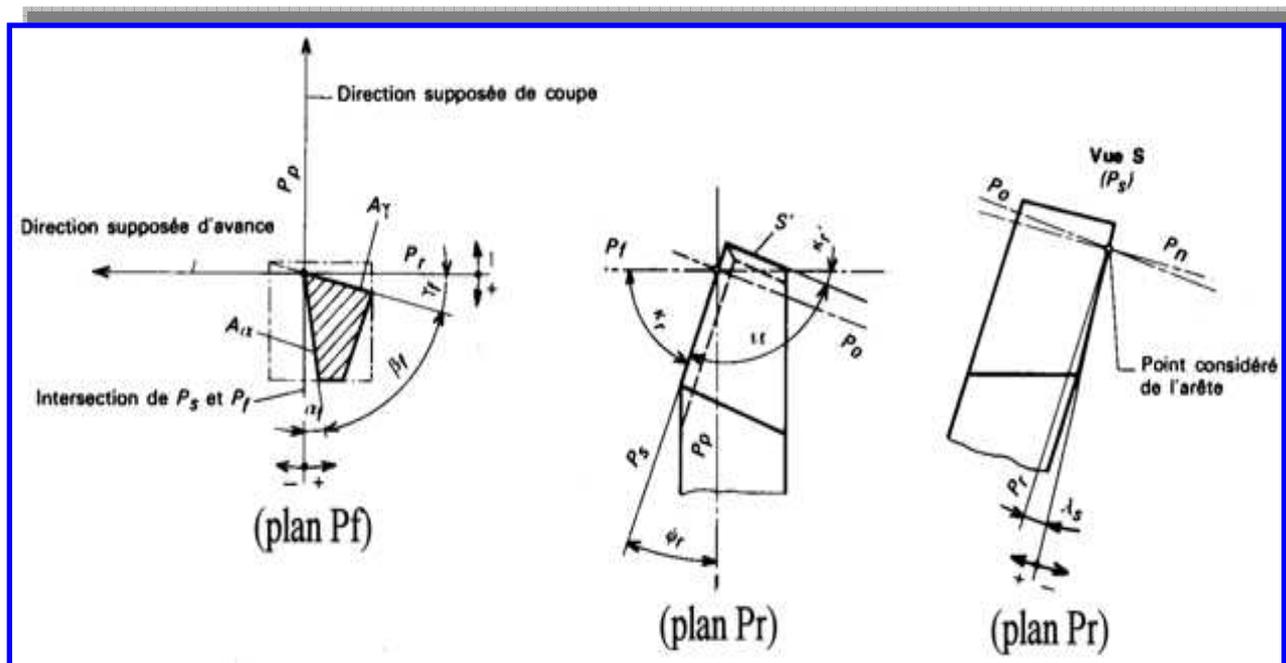


Fig. I.6. Plans et angles en main sur un outil de chariotage

I.3.3.2. Plans de l'outil en travail

- Plan de référence en travail, Pre : plan perpendiculaire au point considéré de l'arête, à la direction de la vitesse résultante de coupe, c'est-à-dire à la direction instantanée du mouvement résultant du mouvement de coupe et du mouvement d'avance simultanés en ce point.
- Plan d'arête en travail, Pse : plan tangent à l'arête, au point considéré, et perpendiculaire au plan de référence en travail Pre . Ce plan contient la direction de la vitesse résultante de coupe.
- Plan de travail, Pfe : plan contenant la direction de la vitesse de coupe et la direction de la vitesse d'avance au point considéré de l'arête. Ce plan est perpendiculaire au plan de référence en travail Pre .
- Plan vers l'arrière en travail, Ppe : plan perpendiculaire au plan de référence en travail Pre et au plan de travail Pfe , au point considéré de l'arête.

I.3.3.3. Angles de direction et d'inclinaison d'arête

L'angle de direction d'arête (κ_r) est l'angle, projeté dans le plan de référence de l'outil P_r , entre l'arête de coupe et la direction d'avance (Fig. I.6). Selon le type d'usinage, l'outil de coupe et/ou le porte outil, un angle de direction d'arête est imposé. Cet angle a une influence sur la direction des forces de coupe, sur la direction d'évacuation des copeaux, la largeur de copeau et sur l'usure de l'outil. L'angle d'inclinaison d'arête (λ_s) est l'angle formé entre l'arête de coupe et le plan de référence P_r dans le plan P_s (Fig. I.7).

Il existe trois solutions: $\lambda_s < 0$, $\lambda_s > 0$, et $\lambda_s = 0$

Conventions

$\lambda < 0$ outil à arête de coupe négative, notation λ_s^-

$\lambda > 0$ outil à arête de coupe positive, notation λ_s^+

$\lambda_s = 0$ outil à arête de coupe normale, notation $\lambda_s = 0$

En général : λ_s varie entre 0° et $+15^\circ$ et entre 0° et -15°

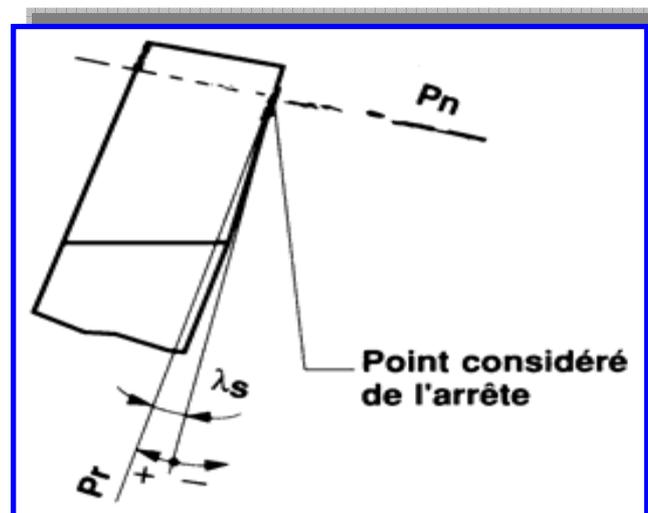


Fig. I.7. Angle d'inclinaison d'arête.

L'angle de direction d'arête de l'outil κ_r :

C'est l'angle, projeté dans le plan P_r , entre l'arête de coupe et la direction d'avance, défini par la direction de la vitesse d'avance (Fig. I.8).

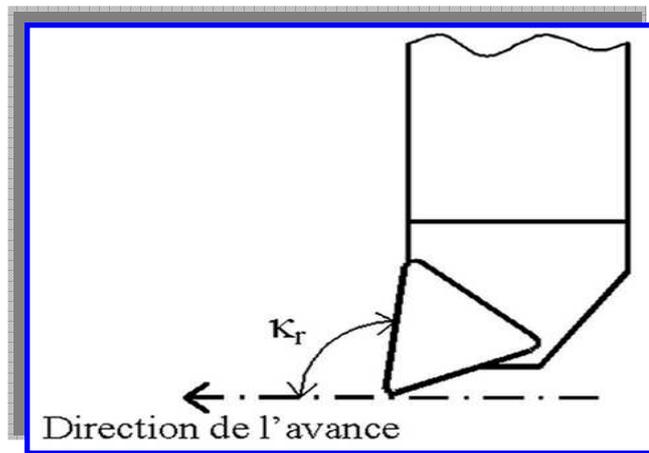


Fig. I.8. Angle de direction d'arête de l'outil.

I.3.3.4. Angles des faces

La position des faces de coupe et de dépouille est définie dans des plans de sections particuliers qui passent tous par un point considéré de l'arête (Fig. I.9). Lorsqu'on fait une section de l'outil par ces plans et quel que soit le plan considéré pour définir la section on trouve :

- Angle de dépouille α : angle aigu entre la face de dépouille $A\alpha$ et le plan d'arête P_s (P_{se}).
- Angle de taillant β : angle aigu entre la face de coupe $A\gamma$ et la face de dépouille $A\alpha$.
- Angle de coupe γ : angle aigu entre la face de coupe $A\gamma$ et le plan de référence P_r (P_{re}).

Les faces de coupe et de dépouille sont reliées par le rayon d'acuité R (Fig. I.10).

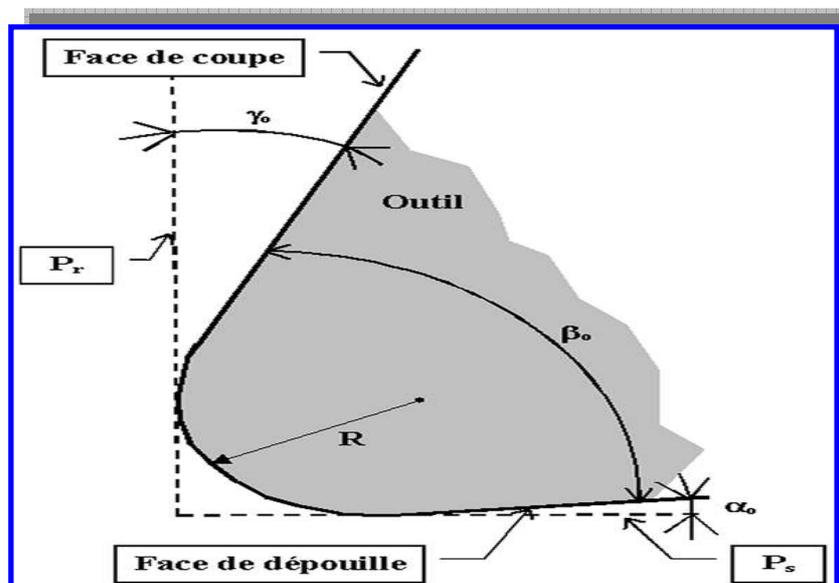


Fig. I.9. Arête de coupe dans le plan P_o .

- Angle entre la face de dépouille et P_s :

Si α_n trop grand : arête de coupe trop fragile

Si α_n trop petit : surface de contact pièce / face de dépouille ↗ risque de talonnage.

- Angle de taillant β :

Angle entre la face de coupe et la face de dépouille.

- Angle de coupe γ :

Angle entre la face de coupe et P_r

γ grand : arête fragile

Écoulement copeau continu

γ petit : frottement important copeau sur face de coupe

$\gamma < 0$: réservé aux outils carbure et céramique

Bonne tenue aux efforts

Les copeaux se brisent facilement

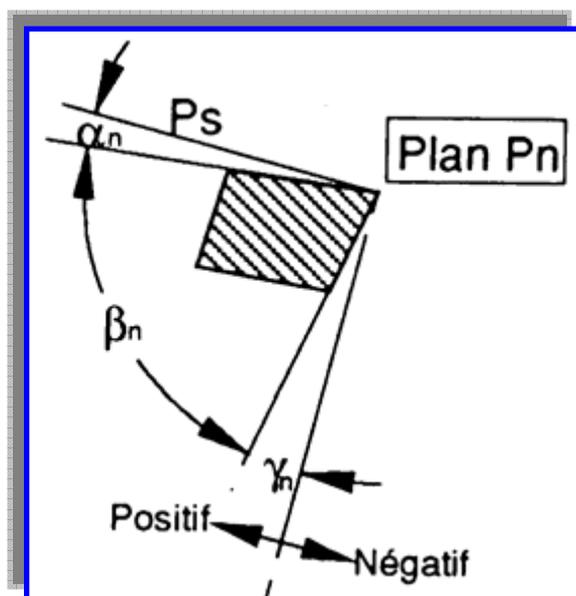


Fig. I.10. Angle de dépouille α

I.4. Principes physiques de la coupe des métaux

Le métal enlevé de l'ébauche par un outil de coupe s'appelle copeau. Le but de ce chapitre est d'étudier la formation du copeau, processus physique complexe, qui s'accompagne de modifications cristallines, de déformations élastiques et plastiques, de rupture. Il donne par ailleurs lieu à un frottement important, à un dégagement de chaleur, à des microsoudures, à la formation d'une arête rapportée, à l'usure de l'outil.

I.5. Formation du copeau et ses types

La compréhension des différents phénomènes qui interviennent lors du tournage est complexe et pas encore maîtrisée. L'enlèvement de matière se fait par action mécanique d'un outil coupant (Fig. I.11). Dans le cas de la coupe orthogonale en régime stationnaire, la force exercée par l'outil lors de son engagement dans la matière provoque, à l'échelle mésoscopique, une forte compression de la matière (une déformation plastique et un échauffement considérable) et engendre une zone de cisaillement intense entre la pointe de l'outil et la surface externe du copeau. Cette zone est appelée zone de cisaillement primaire (ZI) et c'est aussi la zone de formation de copeau. En outre, le copeau formé s'écoule et frotte sur la face de coupe de l'outil. Ce frottement intense génère la zone de cisaillement secondaire (ZII). Cette dernière est constituée d'une fine bande de frottement intense entre le copeau et l'outil et d'une autre bande d'influence du frottement du copeau sur l'outil (cisaillement secondaire). De plus, pendant l'avance de l'outil, la face en dépouille de ce dernier frotte sur la nouvelle surface et produit une troisième zone de cisaillement nommée zone de cisaillement tertiaire ZIII.

Ainsi sont définis :

- 1: la zone morte,
- 2 : la zone de cisaillement primaire,
- 3 : la zone de cisaillement secondaire ou zone de frottement intense,
- 4 : la zone de dépouille principale.

Ainsi et comme le montre la figure I.11, la formation du copeau peut être décrite en définissant différentes zones d'absorption de l'énergie mécanique apportée lors de la coupe, une zone de forte pression hydrostatique au niveau de la pointe de l'outil et les trois zones de cisaillement citées précédemment.

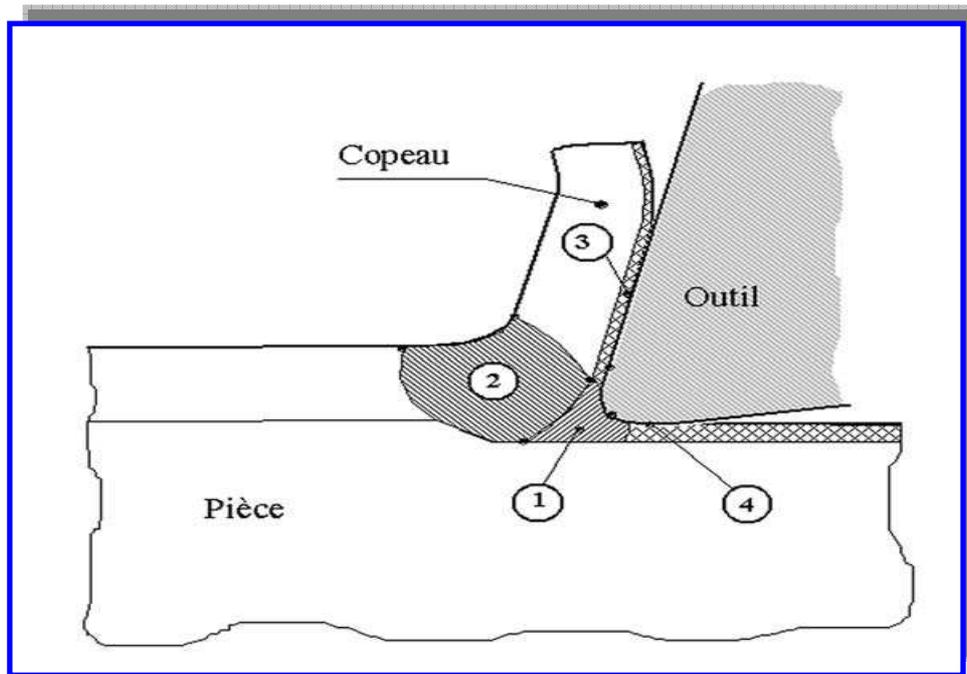


Fig. I.11. Les différentes zones de déformation lors de la formation d'un copeau en coupe orthogonale.

Le phénomène complexe de formation de copeau dépend également fortement de :

- ♦ La rhéologie du matériau usiné (matériau dur, matériau à usinabilité amélioré ...etc.) ;
- ♦ Les propriétés thermo-physiques du matériau usiné et usinant ;
- ♦ La nature et la géométrie de l'outil ;
- ♦ La nature du contact outil-copeau ;
- ♦ La nature de l'opération effectuée (coupe orthogonale, chariotage, ...etc.) ;
- ♦ Procédé d'usinage utilisé (usinage dur, usinage avec assistance ...etc.).

Les principaux facteurs influençant la formation du copeau sont :

- ♦ La vitesse de coupe (V_c) ;
- ♦ La profondeur de passe (a) ;
- ♦ La vitesse d'avance (V_f) ;
- ♦ La géométrie de l'outil ;
- ♦ Les matériaux de l'outil et de la pièce ;
- ♦ La lubrification.

I.5.1. Echelle macroscopique

D'un point de vue macrographique, la forme des copeaux varie et dépend des conditions d'usinage et du couple outil/matière. Les différentes formes macrographiques de copeaux obtenus en usinage sont classées selon la norme NFE 66-505 (voir le Tableau I.1).

I.5.2. Echelle microscopique

Pour mieux comprendre les mécanismes de génération de copeaux, plusieurs auteurs ont eu recours à des essais de coupe interrompue. Ce type de test permet à la fin de l'essai de conserver la racine du copeau attachée à la pièce, et de donner ainsi des informations sur le mécanisme mis en jeu lors de la génération du copeau.

Différentes microphotographies de la couche enlevée en fonction de l'épaisseur et du métal usiné ont ainsi été réalisées. Les formes du copeau varient selon les métaux travaillés et les conditions de coupe. On distingue quatre types: discontinu, cisaille, continu, fragmenté.

1.5.3. Le copeau cisailé

Le copeau cisailé s'obtient lorsque l'usinage de l'acier s'effectue à vitesse moyenne. La face du copeau en regard avec la face de coupe de l'outil est lisse alors que la face opposée porte des entailles bien marquées qui définissent la direction des surfaces de cisaillement des éléments qui, contrairement au copeau discontinu, sont fortement liés les uns aux autres. Un tel copeau soumis à la flexion se rompt. L'augmentation de la vitesse de coupe a donc pour effet de créer une liaison, au sien du copeau, entre les éléments apparaissant lors de la formation du copeau discontinu. Si l'on augmente encore plus cette vitesse nous obtenons la formation d'un copeau continu.

1.5.4. Le copeau discontinu

Il s'obtient par l'usinage des métaux durs et peu ductiles à faible vitesse de coupe. Il est composé d'éléments séparés, déformés plastiquement, peu liés ou pas liés du tout entre eux.

Sous l'action du mouvement de coupe MC, l'outil pénètre progressivement dans la masse du métal et l'effort produit par sa face de coupe provoque des déformations élastiques d'abord, plastique ensuite. A mesure que l'outil s'enfonce, les contraintes dans la couche à enlever

augmentent. Lorsqu'elles atteignent la valeur correspondant à la charge de rupture, elles provoquent le glissement du premier élément suivant la surface de cisaillement. Une fois le premier élément de copeau détaché, l'outil comprime la zone voisine, les contraintes augmentent, un deuxième élément se détache selon le même angle de cisaillement β_i , et ainsi de suite...

1.5.5. Le copeau continu

Sa formation apparaît lorsqu'on usine de l'acier par exemple à grande vitesse. Le copeau s'écoule alors en forme de longue bande sans les entailles caractéristiques du copeau cisailé.

Si, au niveau de l'arête de l'outil les phénomènes restent identiques, l'augmentation de la vitesse de coupe fait croître l'angle de cisaillement ϕ_i et le copeau, dans ses couches proches de la face de coupe, subit une déformation plastique supplémentaire due au frottement.

De ce fait, les grains se rangent, sur une épaisseur comprise entre 2 et 20% de celle du copeau, parallèlement à la face de coupe, provoquant l'enroulement et comme il est important on ne voit plus apparaître les entailles sur la face interne du copeau qui reste malgré tout rugueuse.

D'autre part, les couches attenantes à la surface usinée subissent une déformation supplémentaire, due au retour non parfaitement élastique de la matière coupée ainsi qu'à son frottement sur la face de dépouille et, là encore les grains se rangent parallèlement à la surface produite. (Influence sur l'état de surface, la rugosité).

1.5.6. Le copeau fragmenté

Il s'obtient lors de l'usinage de matériaux friables, fragiles tels que le bronze dur, la fonte... il est constitué l'élément isolée, de forme variée, pas liés ou très peu liés entre eux. Ce copeau ne subit qu'une faible déformation plastique et sa séparation de l'ébauche s'effectue le long de la fente adventive qui se ferme immédiatement selon la surface de cisaillement de configuration quelconque. Les éléments du copeau quittent rapidement la face de coupe de l'outil. La rupture produit des efforts variables et la surface engendrée est rugueuse, arrachée.

I.6. Efforts de coupe

I.6.1. Valeur approximative de l'effort de coupe en tournage

L'effort de coupe F_c dépend de la résistance spécifique à la rupture par compression R_r de la matière travaillée et de son usinabilité, des dimensions du copeau, de l'outil utilisé ainsi que du mode de travail. Pour la commodité des calculs on admet la relation suivante pour l'effort de coupe (Fig. I.12) :

$$F_c = K \times S \times R_r$$

Avec :

R_r : Résistance spécifique à la rupture par compression ;

S : Section du copeau définie par l'avance f et la profondeur de passe a , soit : $S = a \times f$;

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

On adopte généralement les valeurs suivantes $K = 2,5$ à 4 pour les aciers et $K = 4$ à 5 pour les fontes. Pour les efforts d'avance et de pénétration ils sont donnés par les équations suivantes :

$$F_a = (0,2 \text{ à } 0,3) F_c$$

$$F_p = (0,4 \text{ à } 0,5) F_c$$

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

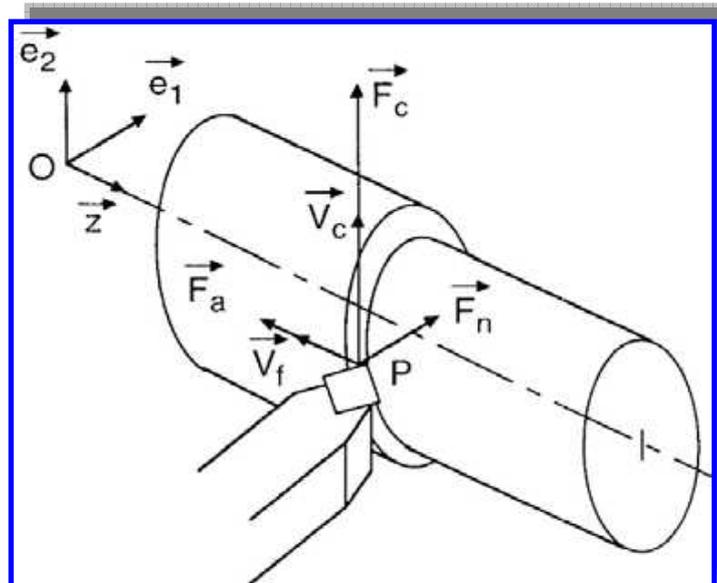


Fig. I.12. Effort de coupe en tournage.

$$F = \sqrt{(0.25.Fc)^2 + (0.45.Fc)^2 + Fc^2} \cong 1.12Fc$$

On prend généralement : $F \approx Fc$

I.6.2. Efforts de coupe lors du perçage

Le foret possède deux arêtes tranchantes et à chacune, en son milieu, s'applique un effort de coupe tangentiel Fc . Les deux efforts forment un couple de moment (Fig. I.13) :

$$Mc = Fc \times D/2$$

La résistance des efforts de coupe s'exerçant sur une arête admet trois composantes :

- ♦ Fc : effort tangentiel de coupe ;
- ♦ Ff : effort d'avance ;
- ♦ Fp : effort de pénétration.

Si le foret est parfaitement affûté et si le matériau de la pièce est homogène, on a :

$$Fc = Fc' ; Ff = Ff' ; Fp = Fp'$$

Les composantes Fp , Fp' égales et pratiquement opposées s'annulent.

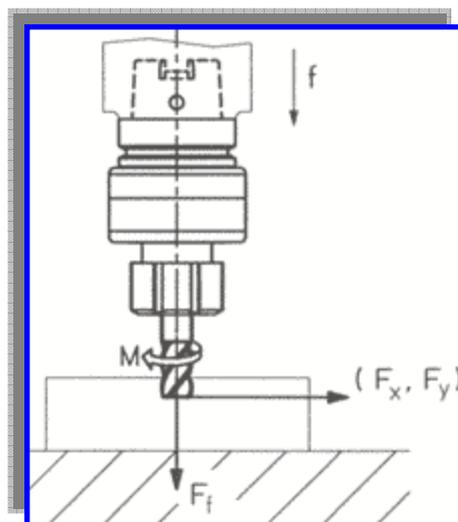


Fig. I.13. Efforts de coupe lors du perçage [17]

La résultante des efforts d'avance est portée par l'axe du foret:

$$R_a = 2 \times F_f = K \times f_{tr} \times D$$

Avec :

- K : Coefficient déterminé expérimentalement ;
- f_{tr} : Avance par tour ;
- D : diamètre du foret en mm.

I.6.3. Effort de coupe lors du fraisage

L'enlèvement de métal est réalisé par deux mouvements conjugués ; un mouvement de coupe (M_c) de l'outil-fraise, entraîné par la broche de la machine et un mouvement d'avance (M_a) de la pièce fixée sur la table. Le sens des efforts qui sollicitent les dents de la fraise est lié au mode du fraisage adopté :

- En opposition ou en sens contraire de l'avance lorsque le mouvement de coupe de l'outil est de sens contraire à celui de l'avance de la pièce.
- En avalant ou en concordance lorsque le mouvement de coupe de l'outil est de même sens que celui de l'avance de la pièce.

Les efforts qui s'appliquent successivement à chaque dent de l'outil sont :

- ♦ l'effort tangentiel de coupe F_c normal au rayon qui abouti à l'arête coupante ;
- ♦ l'effort d'avancement F_f , parallèle à la direction de l'avance ;
- ♦ l'effort de pénétration F_p , perpendiculaire au précédent.

La fraise étant portée par son axe O, les efforts F_f et F_p admettent la résultante F qui passe obligatoirement par O.

L'effort de coupe qui s'applique à chaque dent a pour valeur :

$$F_c = K \times S \times R_r$$

Avec :

S : Section du copeau étant le produit de son épaisseur e par la largeur de coupe C,

Rr : Résistance spécifique à la rupture par compression,

K : Coefficient qui tient compte de l'usinabilité de la matière.

I.6.4. Puissance en travail [Pe]

La puissance P [watts] est égale au produit de la force F [newtons] par la vitesse V [m/sec]

$$Pe = F \times V \text{ [watts]}$$

$$Pe = \frac{Fc * VC}{60 * \eta} = \frac{Rr * K * S * Vc}{60 * \eta}$$

Avec :

- ♦ Rr : Résistance à la rupture [N/mm²];
- ♦ k : Coefficient dépendant de la composition de la matière ;
- ♦ S : Section du copeau [mm²];
- ♦ Vc : Vitesse de coupe [m/min];
- ♦ η : Rendement de la machine.

I.7. Tribologie des contacts copeau-outil et pièce-outil

La formation du copeau implique le triple frottement sec de deux corps pressés l'un contre l'autre (Fig. I.14) :

- Le couple C-O : copeau-outil côté face A_γ ;
- Le système P-O : pièce-outil côté face A_α ;
- Le système P-O : pièce-outil côté face A'_α .

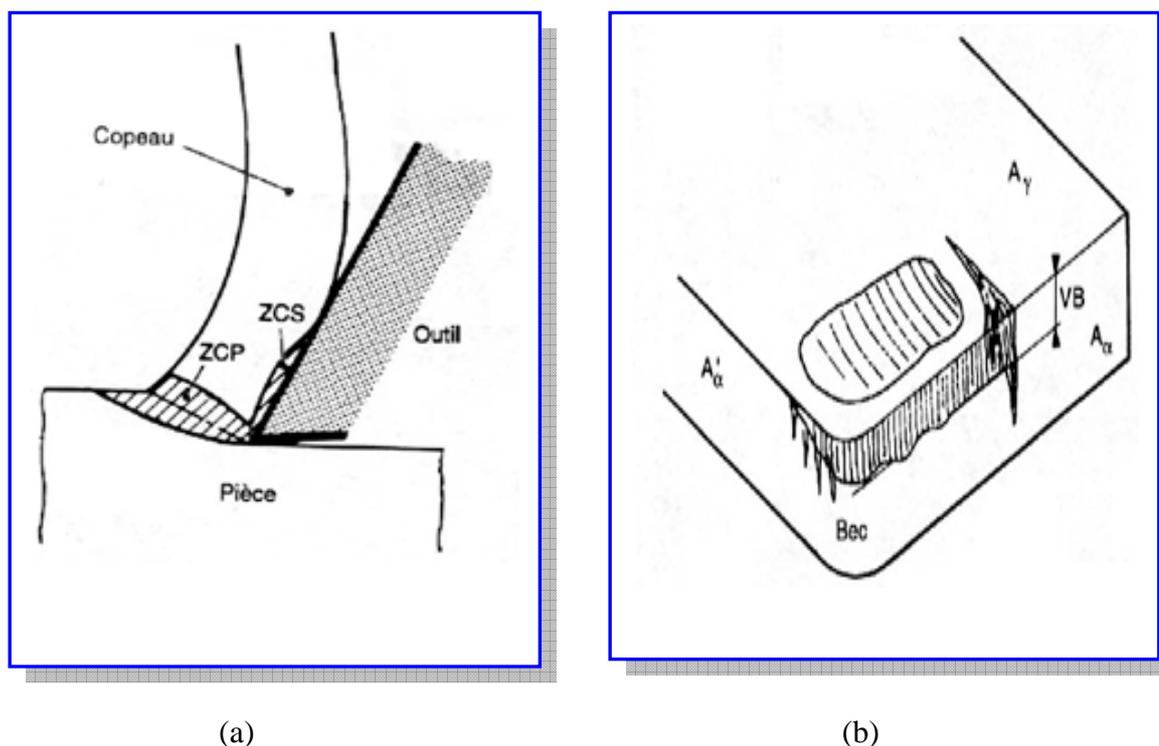


Fig. I.14. Désignation des faces ((a) formation du copeau, (b) usure de l'outil de coupe).

Ces trois types de contact ne sont pas équivalents : le premier se produit à haute température en condition de confinement, le deuxième à température modérée en condition de semi-confinement et le troisième à température modérée en condition de non-confinement. Une bonne connaissance de l'évolution des phénomènes décrits est requise pour optimiser la productivité et la qualité des usinages. Si l'on met à part les ruines d'outils par écaillages et micro-écaillages, on peut observer que les systèmes C-O(A_γ), P-O(A_α) et P-O(A'_α), donnent lieu plus ou moins rapidement à trois faciès d'endommagement macroscopiques (Fig. I.14)

- Une plage d'usure plane sur la face A_α en dépouille principale, dont la hauteur moyenne est couramment désignée par le symbole VB. Quand VB croît, l'arête de coupe recule et les cotes s'écartent de la valeur visée.
- Le creusement d'un cratère sur la face de coupe A_γ , dont la profondeur maximale est couramment désignée par le symbole KT. La résistance mécanique de l'outil décroît lorsque KT augmente.
- Le creusement d'un sillon sur la face A_γ en limite de zone de coupe et d'une multitude de petits sillons sur la face A'_α . L'état de la surface usinée est d'autant plus détérioré que ces sillons sont plus développés.

I.7.1. Analyse du système C-O

Le frottement sec de deux corps sous une pression de contact élevée conduit souvent à la constitution d'un troisième corps plus ou moins stable entre les deux premiers. Passons en revue les paramètres spécifiques de chacun des trois corps C1, C2 et C3 qui déterminent l'évolution du couple frottant C-O.

I.7.1.1. Corps (1) : Copeau

Pour un approfondissement des interférences entre l'endommagement de l'outil par le copeau et les caractéristiques structurales de tel ou tel matériau usiné, on trouvera ci-après une liste type des paramètres du corps (1) qu'il est très souhaitable de prendre en compte (Fig. I.15).

Le copeau se différencie du matériau usiné par l'intense déformation et par le cycle thermique subi. Le copeau est rarement monophasé ; les mécanismes endommageant vont dépendre de chaque famille de phases, et notamment :

- De leur quantité respective et de leur dureté à chaud après écrouissage ;
- De leur répartition et notamment de leur homogénéité et de leur isotropie ;
- De leur histoire thermomécanique et notamment des étapes de la mise en forme des pièces, qui précèdent l'usinage.

Le copeau peut contenir des particules incluses dans ses phases : les inclusions. On distingue couramment entre :

- Les particules qui ont une grande dureté dans la zone de cisaillement secondaire (ZCS), (à la température du contact copeau-outil).
- Les particules visqueuses à la température de coupe dans la zone de cisaillement secondaire (ZCS). Fréquemment, elles contribuent à constituer le corps (3) et ralentissent l'endommagement

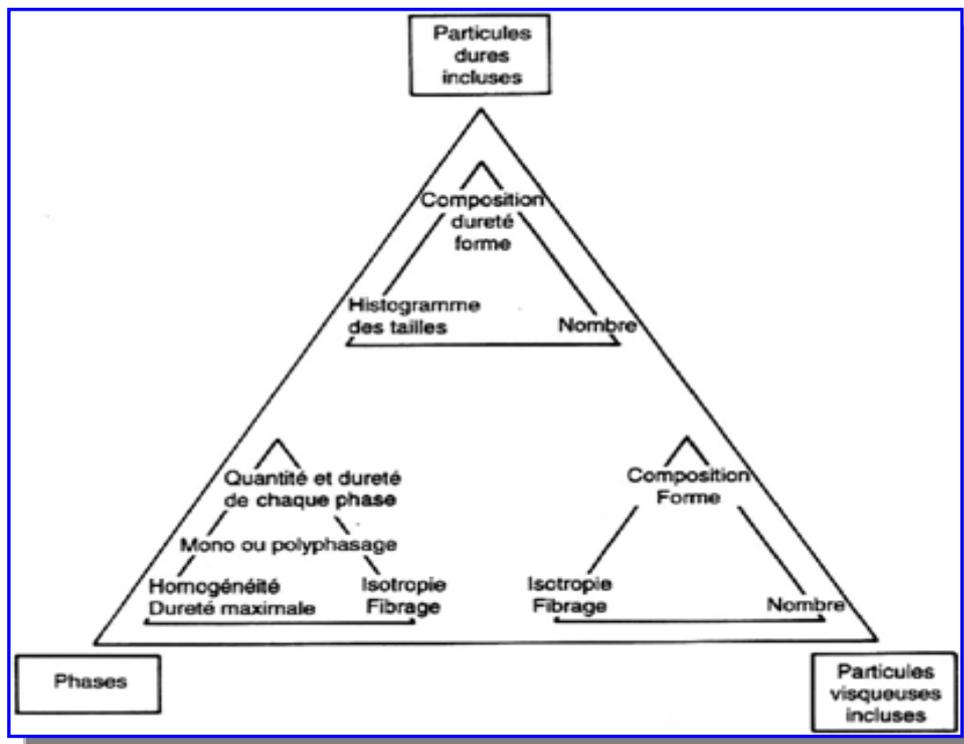


Fig. I.15. Paramètres du comportement du copeau.

I.7.1.2. Corps (2) : L'outil

Pour les mêmes raisons que dans le cas du corps (1), il n'est pas possible de décrire ici les particularités de chaque matériau utilisé pour réaliser un outil. On trouvera seulement ci-après une liste type des paramètres du corps Á qu'il est possible de prendre en compte pour analyser son comportement (Fig. I.16).

L'outil est soumis à un gradient thermique important. L'outil est soumis à des sollicitations mécaniques qui dépendent des conditions de coupe, de la rigidité du contact pièce-outil ainsi que de la technique d'usinage. Des endommagements, tels que la fatigue mécanique, l'écaillage, l'attrition, dépendent de la dureté du matériau de l'outil, de sa compacité, de sa ténacité, etc.

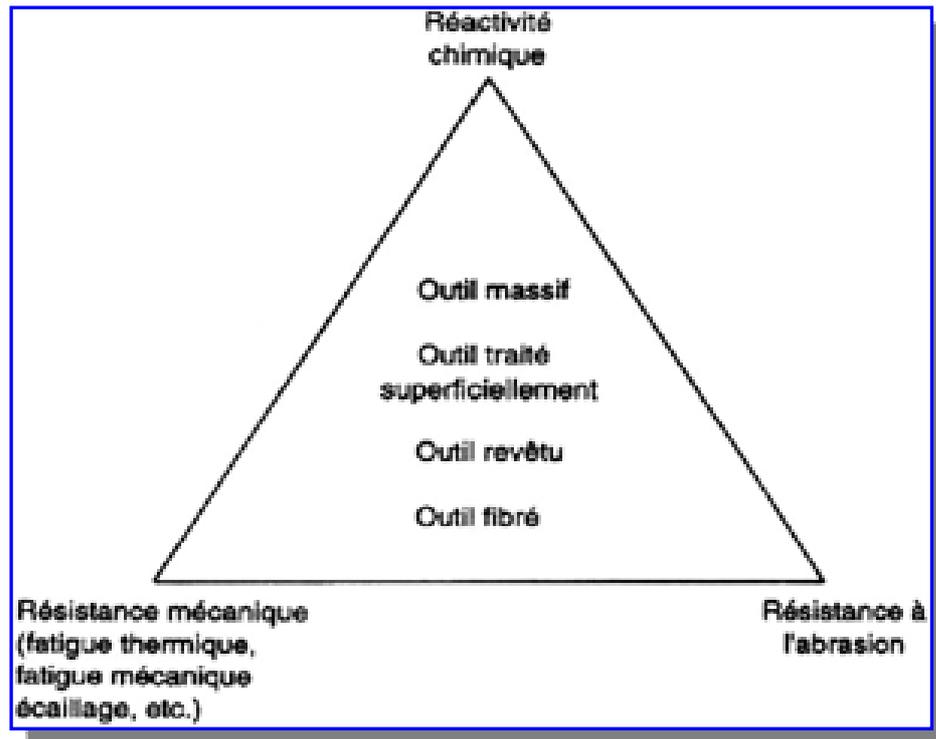


Fig. I.16. Paramètres du comportement d'outil de coupe.

L'outil est en contact intime avec le copeau à haute température. À chaque dégagement, sa face de coupe est exposée au contact de l'air ambiant. Il faut donc considérer la réactivité chimique entre le matériau de l'outil et :

- l'élément principal du matériau usiné ;
- telle ou telle phase incluse du matériau usiné ;
- un constituant de réaction du matériau usiné avec l'air ambiant ;
- l'air ambiant (résistance à l'oxydation de l'outil).

L'outil est endommagé par les phases dures ou les inclusions abrasives du matériau usiné. Sa résistance dépend de sa dureté à chaud, de sa compacité, etc. Très souvent, la surface de l'outil est revêtue ou traitée.

1.7.1.3. Corps (3)

En coupe, on observe trois grandes familles de troisièmes corps (Figures. I.16 et 17) :

- les dépôts macroscopiques, qui sont constitués de particules issues du corps (1) et stabilisées sur le corps (2);

- les dépôts microscopiques qui peuvent être constitués de particules issues du corps (1), avec ou sans réactivité chimique entre celles-ci et le corps (2);
- les débris, qui peuvent être des particules abrasives préalablement incluses dans le corps (1), des produits de réaction du corps (1) avec l'atmosphère, des morceaux du corps (2) arrachés, des morceaux du corps (3) déstabilisés, etc.

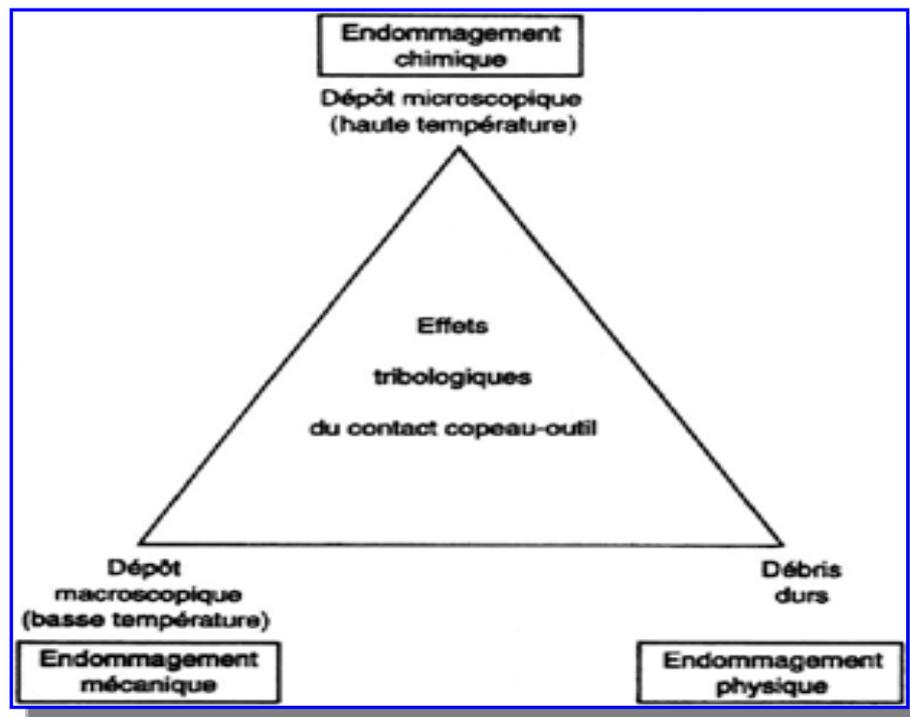


Fig. I.17. Mécanismes endommageants des outils de coupe.

I.8. Bilan des trois types de coupe sur l'usure

- Les dépôts macroscopiques constitués à température moyenne ($\approx 400\text{C}^\circ$) provoquent essentiellement un endommagement mécanique (régime vibratoire de travail de l'outil conduisant à la fissuration et à la rupture) ;
- Les dépôts microscopiques formés à température élevée ($\approx 1000\text{C}^\circ$) donnent lieu à des altérations de l'outil générant ainsi un endommagement chimique;
- Les débris de toute nature sont la cause d'une abrasion de la surface des outils, cela se traduisant par un endommagement physique.

I.9. 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. Le choix de la vitesse de coupe (V_c) dépend de la nature de l'opération effectuée et du couple outil-matière (caractéristiques physiques et mécaniques du matériau usiné et du matériau usinant). En pratique, la vitesse de coupe est réglée par la vitesse de rotation de la pièce (notée N et exprimée en tour.mn^{-1}). La définition de la vitesse de coupe est très importante car elle détermine la vitesse de rotation de la pièce. La vitesse de rotation de la pièce est définie par :

$$N = \frac{1000.V_c}{\pi.D}$$

Avec :

D : diamètre de la pièce exprimée en mm ;

V_c : vitesse de coupe [m.mn^{-1}] ;

N : vitesse de rotation [tour.mn^{-1}].

- **Avance** : les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe, et diminuent la durée de vie de l'outil,
- **Profondeur de passe** : la variation de la profondeur de passe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur le long de l'arête tranchante, son influence reste modeste sur l'usure,
- **Matériau 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 certains éléments d'addition),
- **Lubrification** : son influence intervient faiblement sur le coefficient de frottement pièce-outil et copeau-outil, mais permet la baisse de la température de la partie active de l'outil.

Le phénomène de coupe produit de la chaleur qui est répartie en trois zones (Fig.I.18) :

- ♦ Zone 1 située dans le plan de cisaillement et due aux déformations de la matière.
- ♦ Zone 2 située au contact copeau / face d'attaque de l'outil et due aux frottements dans cette zone.
- ♦ Zone 3 située au contact pièce / face en dépouille de l'outil et due aux frottements dans cette zone.

La quantité de chaleur dégagée est telle qu'elle peut entraîner la fusion locale du copeau et la dégradation rapide de l'outil. Pour remédier à cela, il faut utiliser un fluide afin :

- ♦ de refroidir l'outil et le copeau
- ♦ de lubrifier les surfaces pour diminuer les frottements

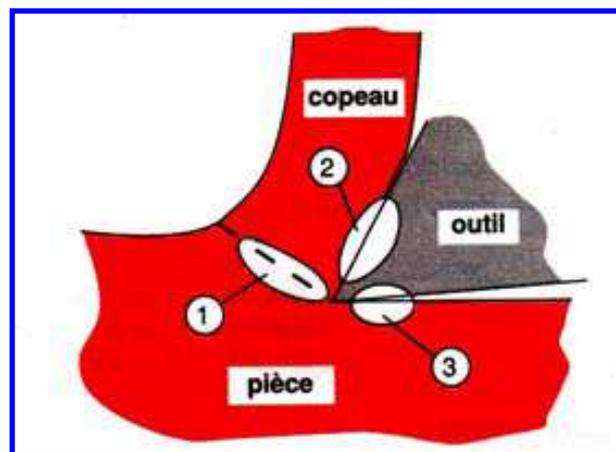


Fig. I.18. Fluide de coupe

I.10. Usure des outils

L'usure de l'outil est due aux contraintes qu'on lui fait subir lors de l'usinage. En effet, la coupe des métaux est une opération de déformation plastique qui doit conduire à la rupture de la matière. Les sollicitations mécaniques et thermiques subies par l'outil sont donc très importantes. Il s'ensuit une usure de l'outil qui peut être d'origine thermomécanique ou chimique. Cette usure est provoquée par la concentration de contraintes en divers endroits de l'outil qui dépend des paramètres de l'usinage, mais aussi :

- de la géométrie de la plaquette : angle de coupe, présence de brise copeau, etc.
- du revêtement et de son comportement mécanique et thermique

Il en résulte une usure apparente schématisée par la figure I.20.

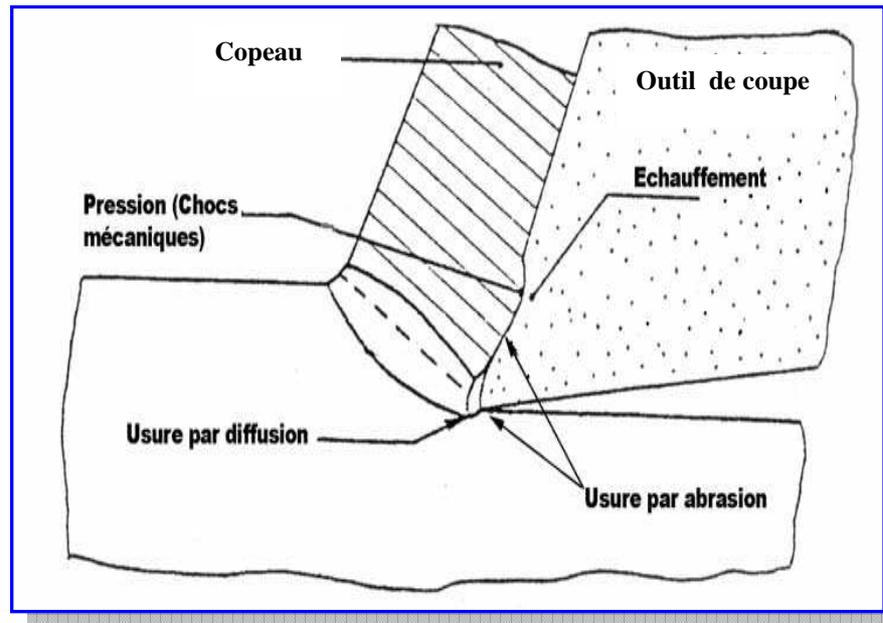


Fig. I.20. Représentation des différentes zones d'usures de l'outil durant la phase de formation du copeau.

I.11. Mécanismes d'endommagement des outils

Berdin prend en compte les phénomènes physiques qui provoquent la dégradation progressive du tranchant et corrélativement des qualités géométriques et mécaniques de la surface usinée, qui se traduisent par certaines modifications d'aspect de celui-ci, visibles à l'œil nu ou à l'aide d'une loupe de forte puissance. Ces manifestations macroscopiques permettent d'apprécier objectivement l'évolution de l'usure en fonction de divers paramètres géométriques mesurables.

L'évolution de l'usure peut se faire par la mesure de la perte de masse en fonction du temps. D'après la figure I.21, on observe l'existence d'un régime transitoire suivi d'un régime stabilisé.

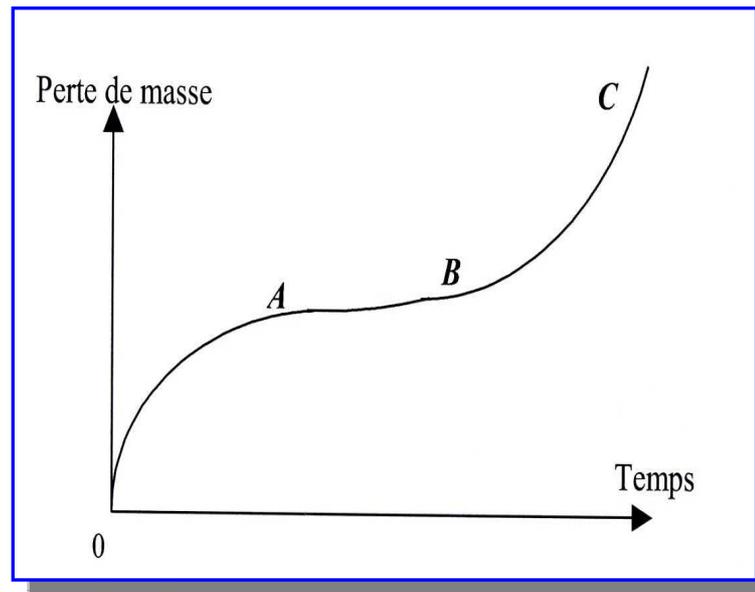


Fig. I.21. Perte de masse en fonction du temps.

Le régime transitoire OA est caractérisé par une croissance rapide de la perte de masse (appelé rodage) et le régime stationnaire AB par une croissance plus lente et plus régulière pratiquement linéaire. La période BC correspond à la destruction rapide de l'outil.

Au cours d'un usinage, l'ensemble de ces processus se produit. Suivant les conditions d'usinage certains processus sont favorisés par rapport à d'autres. En général on peut dire que :

- les processus d'abrasion et d'adhésion sont favorisés lors des usinages où les températures sont faibles et où les vitesses de défilement du copeau sont faibles. En effet, dans ces cas là, il n'y a pas de formation de couche de glissement due à la température ou aux vitesses élevées. Il y a donc grippage ou arrachement.
- les processus de diffusion, de déformation plastique, d'oxydation sont favorisés par l'élévation de la température et des vitesses de coupe.

Ce qui peut se résumer d'après KONIG par le diagramme suivant (Fig. I.22) :

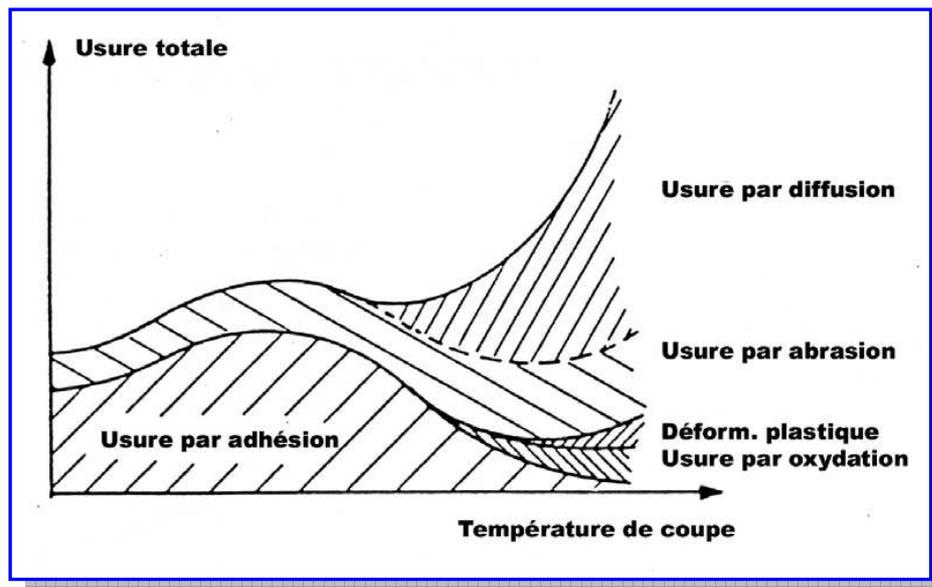


Fig. I.22. Diagramme de combinaison des différents processus d'usure en fonction de la température d'usinage (parallèle possible avec la vitesse).

Ces différentes formes d'endommagement font intervenir, à des degrés plus ou moins importants, les mécanismes suivants :

I.11.1. Déformation plastique et fatigue (mécanique)

Les déformations plastiques se produisent sous l'effet combiné des grandes pressions et des grandes températures générées pendant l'usinage. Elles apparaissent au niveau de la pointe de l'outil et sur la face de coupe de celui-ci. Les conditions d'usinage sévères (grandes vitesses de coupe et grandes avances) ainsi que la dureté élevée de certaines pièces sont donc favorables à l'apparition de tels phénomènes. Les dimensions et la géométrie des outils (acuité de l'arête) sont les principaux paramètres pour prévenir l'usure par déformation plastique. La fatigue des outils est due aux combinaisons des phénomènes thermiques et mécaniques. Les fluctuations de la température, le chargement et le déchargement des efforts peuvent en effet conduire à la fissuration des outils et/ou à l'effondrement des arêtes de coupe.

I.11.2. Usure par adhésion : arête rapportée

Sous l'effet de la pression, de véritables soudures se créent entre l'outil et le copeau par écrasement/entrelacement des aspérités ou par des phénomènes d'adsorption et de solubilité s'il existe une affinité chimique entre les atomes qui constituent les deux surfaces. Lorsque les

jonctions formées se rompent, des fragments de matière provenant du copeau restent accrochés sur la face de coupe de l'outil. Dans certaines conditions, notamment à faible vitesse de coupe, les éléments du copeau qui ont tendance à coller s'accumulent de manière importante pour former un dépôt macroscopique (Figure. I.23(a)) que l'on appelle arête rapportée (Built-Up Edge). Comme l'arête rapportée (BUE) a tendance à grossir, elle devient instable et finit par se briser. Une partie de la matière est emportée par le copeau, le reste peut passer sous l'arête de coupe et coller à la surface de la pièce. Le processus de formation et de destruction de l'arête rapportée peut se répéter plusieurs fois au cours d'un usinage causant une variation périodique de l'avance et de l'angle de coupe. Il en résulte une modification importante des dimensions souhaitées du produit fini et une détérioration de son état de surface.

L'évacuation des fragments de copeaux adhérents ou de l'arête rapportée peut s'accompagner d'arrachement d'une partie de la couche superficielle de l'outil sur laquelle s'est constitué le dépôt, ce phénomène d'usure est appelé attrition. Il est encore plus néfaste vers la fin de l'usinage au moment où l'outil se désengage de la pièce et l'arête rapportée expulsée. Le mécanisme de formation d'arête rapportée est encore mal connu, mais il est généralement associé au phénomène d'écrouissage de la matière qui semble être prédominant dans la formation du copeau aux faibles vitesses de coupe. L'utilisation de vitesses de coupe suffisamment élevées permet souvent de limiter l'apparition de l'arête rapportée (Figure. I.23(b)).

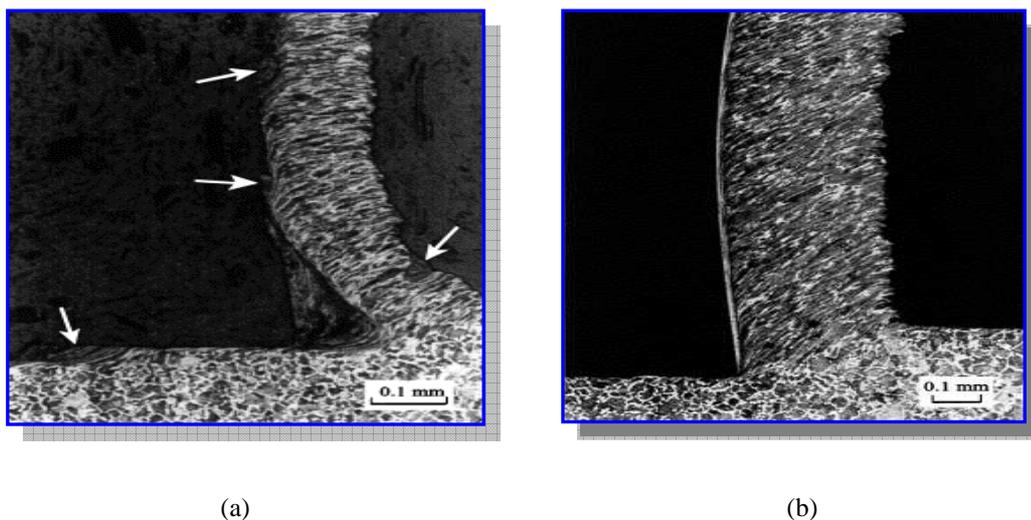
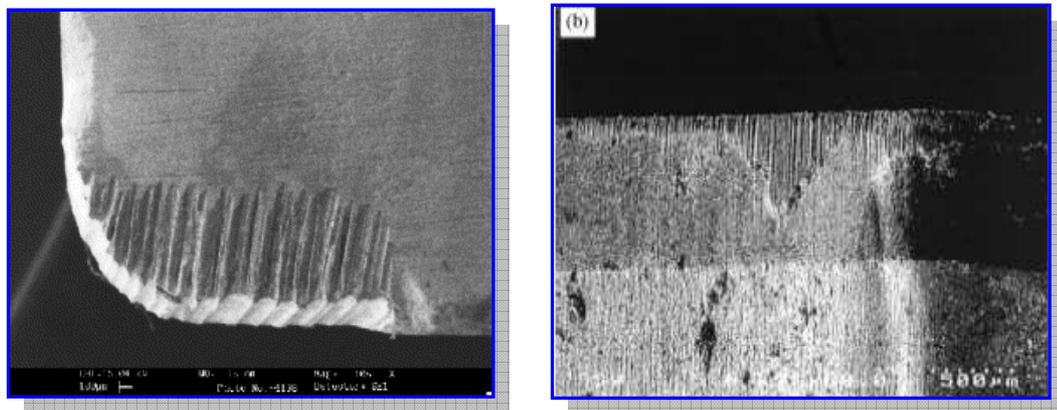


Fig. I.23. Coupe orthogonale d'acier : (a) $V_c = 0,5 \text{ m/s}$, $f = 0,2 \text{ mm/tr}$, les flèches blanches indiquent les dépôts de matière laissés sur la pièce après l'évacuation de l'arête rapportée.

(b) $V_c = 2 \text{ m/s}$, $f = 0,2 \text{ mm/tr}$.

I.11.3. Usure par abrasion (mécanique)

L'usure par abrasion se caractérise par la formation de bandes striées dans la direction de contact avec la surface usinée de la pièce ou dans la direction du copeau qui glisse le long de la face de coupe. L'usure par abrasion apparaît donc à la fois sur la face de coupe (Figure. I.24(a)) et sur la face de dépouille des outils (Figure. I.24(b)). Ce sont les particules dures qui sont à l'origine de cette usure. Elles peuvent être présentes dans la pièce sous la forme d'inclusions et de précipités ou provenir de l'outil lui-même par d'autres mécanismes d'usure telle que l'adhésion. De micro copeaux sont ainsi arrachés à l'outil par ces éléments durs qui sont sans cesse renouvelés au cours de l'usinage. L'usure par abrasion est l'usure dominante quand le contact à l'interface outil-copeau est essentiellement du glissement.



(a)

(b)

Fig. I.24. Usure par abrasion (a) sur la face de coupe après usinage d'alliage de titane, (b) sur la face de dépouille après usinage de Duralcan.

I.11.4. Usure par fissuration (mécanique)

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

I.11.5. Usure par diffusion (physico-chimique)

La diffusion de matière de l'outil vers le copeau est un phénomène d'usure qui ne peut se produire qu'à des températures élevées. Ces zones de températures élevées se situent à l'endroit du frottement du copeau sur l'outil. De plus, ce sont aussi des zones de forte pression car le copeau applique des contraintes sur l'outil.

Les hautes températures, ainsi que les pressions et la vitesse relative de défilement du copeau, permettent de donner suffisamment d'énergie (élévation de température) aux atomes pour que ceux-ci puissent migrer de l'outil au copeau. Ce processus est aussi grandement accentué par les phénomènes d'affinités chimiques que l'on peut avoir entre les atomes de la matière usinée et les atomes de l'outil (Fig. I.25).

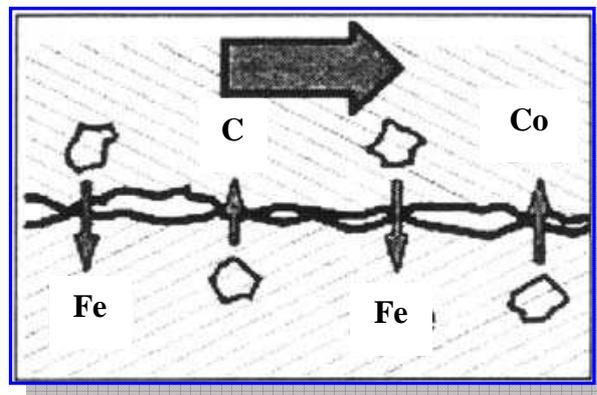


Fig. I.25. Processus d'usure par diffusion.

I.11.6. Usure par oxydation (physico-chimique)

Le milieu de l'usinage est constitué :

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

Avec l'élévation de température de l'outil, la vaporisation de l'eau contenue dans les huiles solubles au contact de l'outil et l'oxygène de l'air provoquent localement une fragilisation de l'outil par oxydation de ce dernier (Fig. I.26). De plus, le potentiel d'oxydoréduction des

matériaux diminue avec la température ce qui favorise d'autant le processus d'oxydation des outils.

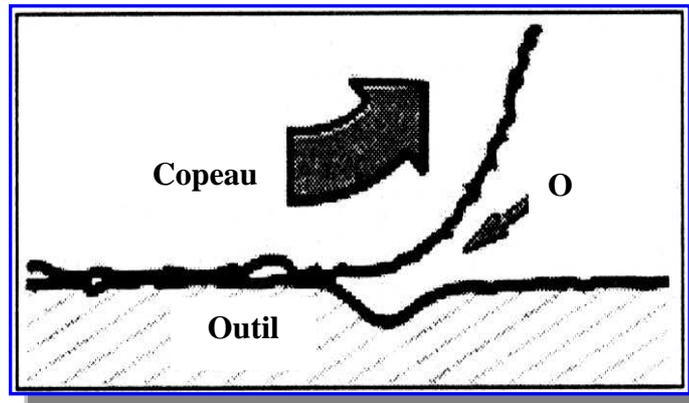


Fig. I.26. Processus d'usure par oxydation.

I.11.7. Usure avec effet de chocs

L'écaillage des faces de l'outil peut résulter d'une certaine fragilité ou de fatigue mécanique et thermique. Pour une rupture fragile, un tel endommagement apparaît dans les premiers instants de coupe. Il est dû à un excès d'effort de coupe. Le fatigue mécanique entraîne la rupture sous l'effet de variation de sollicitations dues au mode d'usinage (coupe discontinue), à la géométrie des pièces (faux rond, rainure,...), ou encore à la structure du métal usiné (calamine, tôle oxycoupée.....).

Les chocs thermiques supportés par les outils sont très sévères soit pendant les arrêts de coupe soit par le refroidissement dû à un arrosage discontinu. La température décroît très vite en surface et plus lentement dans le cœur. La surface de l'outil est mise en traction et des fissures thermiques peuvent apparaître.

I.12. Manifestation de l'usure

L'observation de la partie active de l'outil fait apparaître des formes d'usure caractéristiques qui correspondent aux conditions dans lesquelles l'outil travaille, selon la nature des matériaux en présence (outil-pièce), selon les conditions extérieures dues à l'environnement et enfin selon le régime de coupe affiché (Fig. I.27 et 28), on peut rencontrer les diverses formes d'usure suivantes:

Indices :

- KM : Distance du centre du cratère / pointe initiale de l'outil
- KT : profondeur d'un cratère
- KB : Largeur du cratère
- γ_c : Angle de cratérisation
- VB : Hauteur de l'usure en dépouille
- VN : profondeur d'entaille par rapport à l'arête de coupe initiale
- V_{BC} : Profondeur entre l'arête initiale et la zone usée
- SV : Profondeur entre l'arête initiale et la pointe de l'outil usée

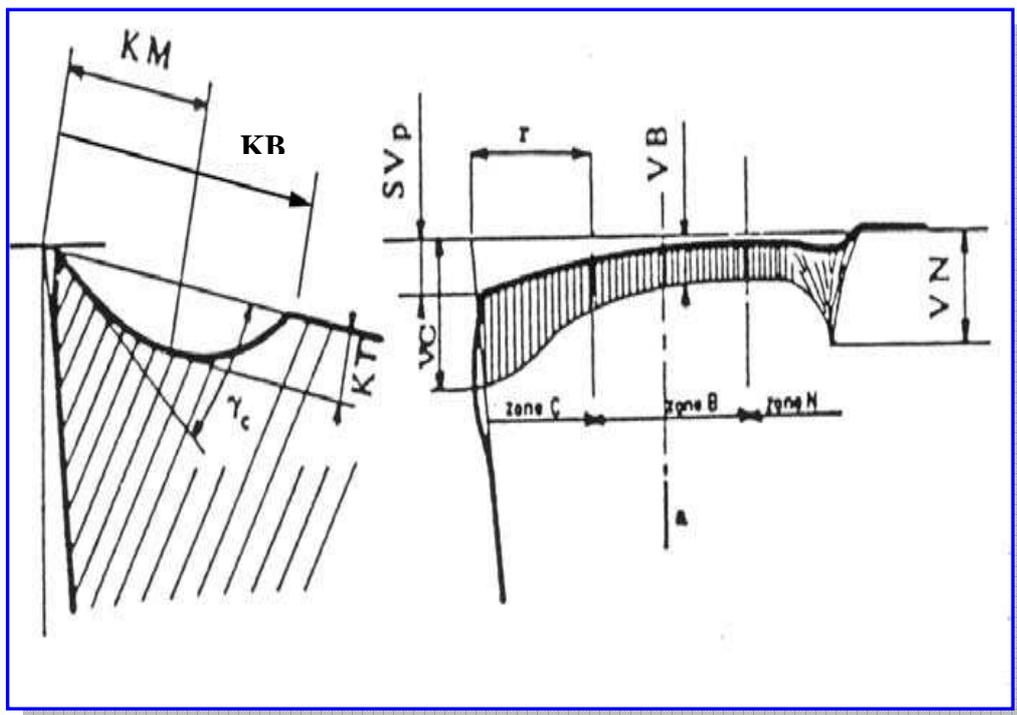


Fig. I.27. Formes d'usure de l'outil de coupe d'après la norme NFE 66 505.

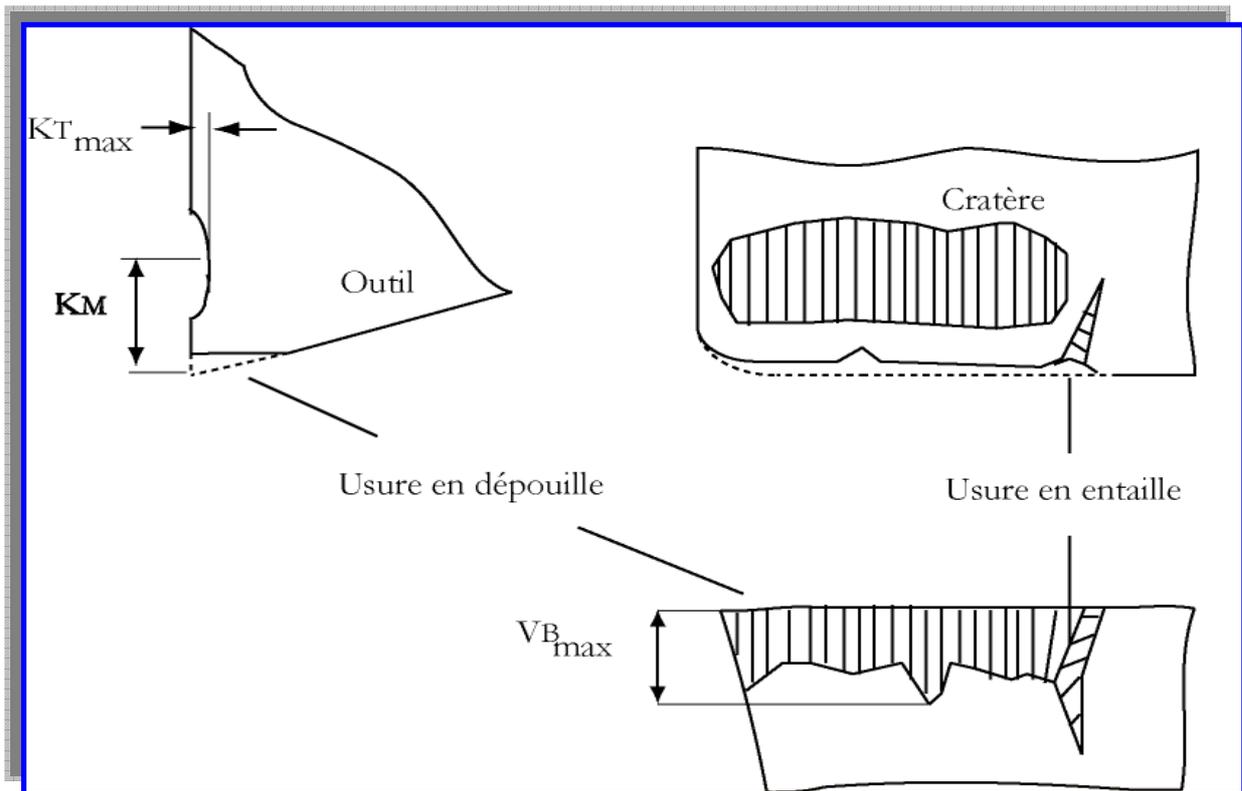


Fig. I.28. Manifestation et mesures des usures.

I.12.1. Usure frontale

Elle s'observe sur la face en dépouille principale de l'outil. Elle apparaît suivant une bande striée brillante et parallèle à l'arête de coupe (Fig. I.28). Elle se manifeste lors de travaux de finition, à forte de vitesse de coupe et à faible avance, elle set due conjointement aux températures élevées qui se produisent le long de l'arête de coupe et au frottement continu de la surface de la pièce sur la face en dépouille de l'outil. Sur le plan pratique, cette forme d'usure est la plus importante puisqu'elle conditionne simultanément l'état de surface de la pièce usinée et la précision dimensionnelle. On la caractérise par la distance entre l'arête de coupe initiale et la droite associée aux crêtes situées sur la face en dépouille (V_B).

I.12.2. Usure cratère

Elle s'observe sur la face d'attaque de l'outil sous la forme d'une cuvette obtenue par frottement intense du copeau (Fig. I.28). Cette forme d'usure se manifeste principalement lors de travaux d'ébauche, à faible vitesse de coupe et à forte avance, sur les matériaux abrasifs. L'effort très

important exercé par le copeau-outil, des températures élevées favorables à l'usure par diffusion. L'observation de cette forme d'usure se rencontre plus fréquemment sur les outils en carbure métallique et en céramique qui offrent une structure plus favorable que les outils en acier rapide. L'usure sur ces derniers se stabilise après sa naissance par un écrouissage superficiel du métal (symbole K_T , pour respecter les appellations de la norme française NEF66505). On caractérise l'usure en cratère par la profondeur K_T , le rapport K_T/K_M ou par l'angle de caractérisation.

I.12.3. Usure par déformation plastique

La pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des hautes pressions régnant dans la zone de coupe. On rencontre en particulier ce type d'usure dans l'utilisation des outils de carbures lors d'usinage des matériaux à hautes résistances mécaniques ou à faible usinabilité.

Cette déformation se traduit par un affaissement plastique de la pointe de l'outil caractérisé par la valeur de la flèche SV_p , et par un renflement sur les faces en contre dépouille (Fig. I.27). Il s'en suit une modification importante de la géométrie de la pointe de l'outil qui nuit à la précision et à l'état de la surface usinée.

L'affaissement plastique entraîne une usure frontale vers la pointe de l'outil (zone C, Fig. I.27) de valeur V_C généralement supérieure à la valeur V_B dans la zone centrale B, et une déformation importante du cratère. Celui-ci présente alors une profondeur maximale au niveau de l'arête secondaire de l'outil.

I.13. Usure visible sur l'outil

I.13.1. Usure par déformation plastique de l'arête

Ce type d'usure est caractérisé par l'effondrement de l'arête tranchante. Si la température sur l'arête devient trop élevée, celle-ci peut se déformer sous l'effet de la contrainte mécanique (Fig. I.29).

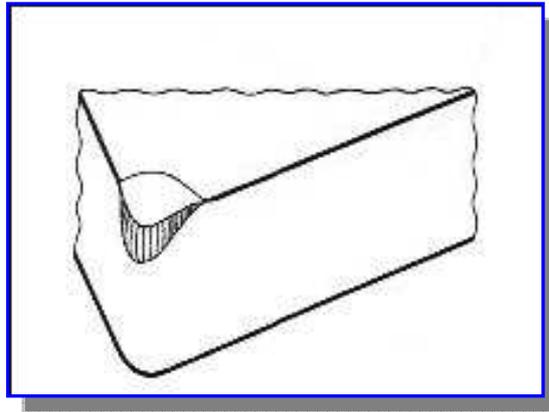


Fig. I.29. Usure par déformation plastique de l'arête.

Mesures correctives :

- Choisir une nuance plus tenace,
- Utiliser une plaquette plus robuste et dotée d'un rayon de bec plus important,
- Choisir une géométrie brise-copeaux pour section de copeaux plus importante,
- Réduire l'avance et éventuellement aussi la profondeur de passe.

I.13.2. Usure par écaillage de l'arête

Se constante quand la fragilité de la nuance employée est trop grande en égard au travail à exécuter, ou également, quand l'outil subit des chocs thermiques. Des criques se forment perpendiculairement à l'arête de coupe et des particules de carbure sont arrachées progressivement de cette arête (Fig. I.30).

Mesures correctives :

- Choisir une nuance plus tenace,
- Utiliser une plaquette présentant une géométrie d'arête plus stable,
- Réduire l'avance en début de coupe, en cas d'écaillage par impact de copeaux,
- Choisir une géométrie brise-copeaux différente,
- Modifier l'angle de direction d'arête de l'outil,
- Faire une préparation d'arête de coupe (rodage de l'arête de 0,04 mm par exemple).

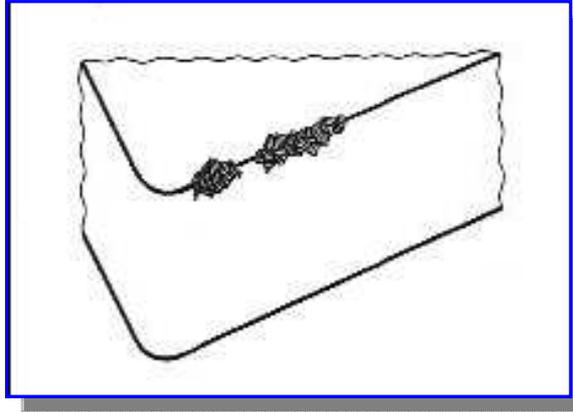


Fig. I.30. Usure par écaillage de l'arête.

I.13.3. Usure par arête rapportée ou copeau adhérent

Ce type d'usure est due à une température trop basse dans la zone de coupe, ce qui provoque un mauvais écoulement du copeau et celui-ci se soude à l'arête. Ce copeau adhérent entraîne un accroissement de la puissance nécessaire à la coupe, et une détérioration rapide de l'état de surface de la pièce (Fig. I.31).

Mesures correctives :

- Accroître la vitesse de coupe,
- Utiliser les métaux durs revêtus ou des cermets,
- Choisir une géométrie d'arête positive,
- Travailler avec arrosage.

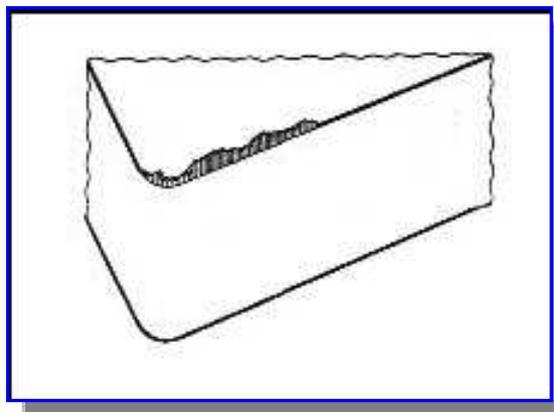


Fig. I.31. Usure par arête rapportée.

I.13.4. Usure en dépouille

Il caractérise la durée de vie. Quand il est trop grand les efforts de coupe augmentent et l'état de surface est moins bon (Fig. I.32). C'est un critère général pour la tenue d'outil, caractérisée par une valeur d'usure admissible V_B . Les valeurs indiquées se rapportent généralement à une tenue d'outil (durée de vie $T=15$ min).

$$V_{B \text{ critique}} = 0,6 \text{ mm en ébauche et } 0,3 \text{ mm en finition}$$

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

Mesures correctives :

- Choisir une nuance présentant une meilleure résistance à l'usure,
- Réduire la vitesse de coupe.

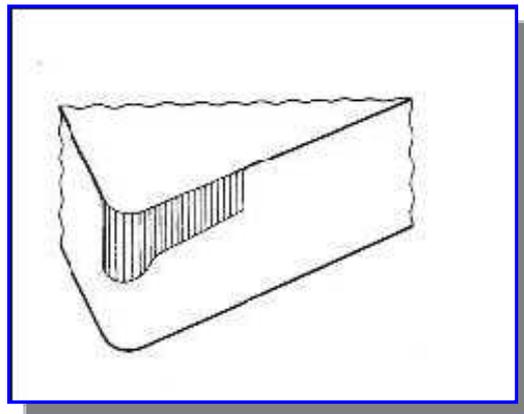


Fig. I.32. Usure en dépouille.

I.13.5. Usure en cratère

C'est une usure en creux sur la face de coupe (Fig. I.33), elle est due de frottement du copeau sur la face de coupe de l'outil. Lors de l'usinage la température élevée à l'interface copeau-outil et les pressions de contact entre le copeau et l'outil, provoque une diffusion importante de la matière de l'outil vers le copeau par processus d'adhésion. Elle donne aussi une déformation plastique de la pointe de l'outil, caractérisée par processus S_{VP} et un renflement de la face de

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

$$\text{Valeur limite : } K_{T \text{ critique}} = 0,06 + 0,3 f^2$$

La valeur critique est celle à partir de laquelle l'outil est considéré comme hors d'usage avec risque important de rupture de l'outil (f : avance par tour).

Mesures correctives :

- Utiliser des nuances de métal dur revêtu,
- Choisir des plaquettes à géométrie positive
- Réduire la vitesse de coupe ou augmenter l'avance

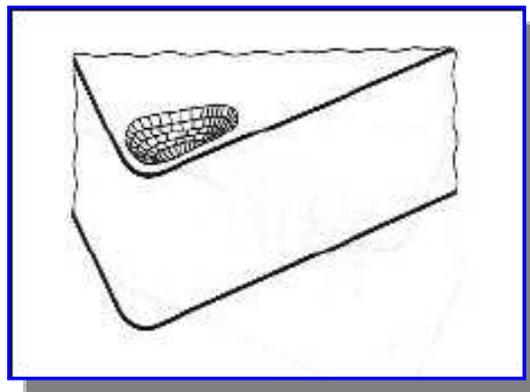


Fig. I.33. Usure en cratère.

I.14. Critères d'usure

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

I.14.1. Les critères directs

Ils sont basés sur l'évolution de l'usure (Fig. I.10) :

- Critère d'usure frontale, caractérisé par une largeur limite V_{Blimite} de la bande d'usure sur la face en dépouille de l'outil ;

- Critère de cratérisation, défini par la valeur limite de la profondeur du cratère $K_{T\text{limite}}$, ou par la valeur limite du rapport de cratérisation K_T/K_M , ou par une valeur limite de l'angle de cratérisation α_c ;
- Critère de mort d'outil, utilisé principalement pour les outils en acier rapide ;
- Critère d'usure volumétrique ou massique caractérisé par la perte en poids de l'outil, mesurée par pesée ou à l'aide de traceurs radioactifs ;
- Critère basé sur les variations de cotes des surfaces usinées, actuellement utilisé pour la détermination de l'usinabilité des aciers.

I.14.2. Les critères indirects

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

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

1.15. Procédés d'usinage

1.15.1. Principales machines-outils leur travail

Les principales machines-outils utilisées en construction mécanique comprennent :

1.15.1.1. Les machines à outil de coupe

1.15.1.1.1. Machines dont le mouvement de coupe est rectiligne

a) Machines utilisant un outil à tranchant unique

- l'outil est animé du mouvement de coupe et la pièce du mouvement d'avance :
 - Etaux-limeurs,
 - Mortaiseuses.
- la pièce est animée du mouvement de coupe et l'outil du mouvement d'avance :
 - Raboteuses.

b) Machines utilisant un outil à tranchants multiples

- Machines à brocher.

1.15.1.1.2. Machines dont le mouvement de coupe est circulaire

a) Machines utilisant un outil à tranchant unique

- la pièce est animée du mouvement de coupe et l'outil du mouvement d'avance :
 - Tours.
- l'outil est animé à la fois du mouvement de coupe et du mouvement d'avance :
 - Machines à aléser.

b) Machines utilisant un outil à tranchants multiples

- l'outil est animé à la fois du mouvement de coupe et du mouvement d'avance :
 - Machines à percer.
- l'outil est animé du mouvement de coupe et la pièce du mouvement d'avance :
 - Machines à fraiser.

1.15.1.2. Les machines à outil abrasif

a) Machines à rectifier

- Machines à rectifier les surfaces de révolution.
- Machines à rectifier les surfaces planes

b) Machines à meuler et affûter

c) Machines à roder.

Les planches qui suivent donnent, sur les différentes machines-outils, des renseignements se rapportant :

- Aux outils employés ;
- Aux surfaces usinées ;
- A la forme des machines.

Fig. I.34. Caractéristiques des principales machines-outils.

Fig. I.35. Machines à raboter : L'étou-limeur.

Fig. I.36. La machines à mortaiser.

Fig. I.37. Machines à raboter : La raboteuse.

Fig. I.38. Les machines à brocher.

(a)

(b)

Fig. I.38. Les tours.

Fig. I.39. Les machines à aléser.

Fig. I.40. Les machines à percer.

(a)

(b)

Fig. I.41. Les machines à fraiser.

(a)

(b)

Fig. I.41. Les machines à rectifier.

1.15.2. Usinage avancé

1.15.2.1 Introduction

L'usinage par enlèvement de matière à l'outil coupant est un des plus vieux procédés de mise en forme. Les tribus primitives utilisaient déjà ce procédé pour fabriquer les outils de chasse et depuis, ce procédé n'a jamais cessé de se développer.

Les dernières décennies (années 80 et 90) ont connu un niveau d'activités sans précédent par des avancées dans les connaissances scientifiques fondamentales et par le développement de nouveaux procédés d'usinage.

Pour améliorer l'usinabilité des matériaux métalliques réputés difficiles et/ou durs à usiner, de nouveaux procédés d'usinage avec assistance ont été développés. Parmi ces nouveaux procédés, nous pouvons citer : l'usinage assisté laser, l'usinage assisté jet d'eau haute pression, l'usinage assisté ultrasons et l'usinage assisté champ magnétique.

1.15.2.2. Usinage assisté jet d'eau haute pression

Le tournage assisté jet d'eau haute pression est l'une des méthodes permettant d'améliorer la productivité. Diverses recherches ont démontré que l'application d'un jet haute pression au niveau de l'interface outil-copeau permet de contrôler et d'améliorer la fragmentation des copeaux. Avec ce procédé, il ne s'agit plus de noyer la zone de coupe avec un lubrifiant, mais de viser une zone précise et parfaitement définie (Figure. I.42), en intégrant une gestion optimale des nombreux paramètres mis en jeu. En effet, viser l'interface outil-copeau va permettre de créer un coin hydraulique entre le copeau et la plaquette. Cela augmente nettement la durée de vie de l'outil, améliore la fragmentation des copeaux, diminue les efforts de coupe et les contraintes résiduelles en surface.

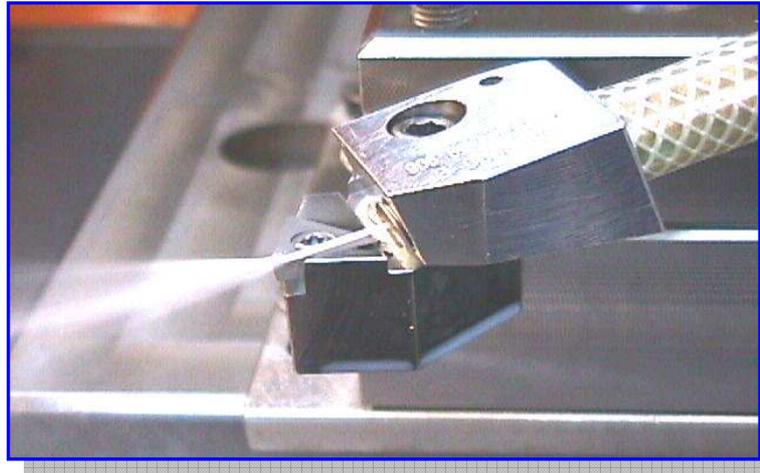


Fig. I.42. Principe de l'usinage assisté jet d'eau haute pression.

L'effet de l'assistance jet d'eau sur la température à la pointe d'outil, sur la forme des copeaux et la rugosité a été exploré par Kaminski. Les résultats obtenus montrent une réduction de 40 à 45 % de la température de la pointe d'outil avec l'utilisation d'un jet d'eau. Ces auteurs concluent que l'assistance haute pression permet de contrôler la forme des copeaux et de changer les conditions de frottement outil-copeau et l'angle du plan de cisaillement. Kovačević et al, ont étudié le rôle de l'assistance jet d'eau haute pression dans le cas du fraisage. Ils ont analysé l'influence de la position et de la direction du jet et suivant ceci, une diminution remarquable des efforts de coupe et de l'usure de l'outil sont observées. Le copeau est fragmenté (la fragmentation est due au phénomène de coupe discontinue) et l'état de surface est amélioré.

La simulation de l'usinage assisté jet d'eau dans le cas de la coupe orthogonale a fait l'objet de l'étude de Shet et al. Cette étude a permis de donner des informations sur l'évolution des efforts de coupe, de la température de coupe et des contraintes résiduelles en fonction des conditions de coupe et de la présence du jet haute pression (vitesse de coupe, avance, position du jet ...).

Pour comprendre les phénomènes qui se produisent pendant l'usinage assisté jet d'eau haute pression et voir le rôle de cette assistance sur la forme des copeaux et les contraintes résiduelles des pièces usinées, des expérimentations de dressage de face, ont été menées à différentes vitesses de coupe et d'avance, avec assistance haute pression (20, 50 et 80 MPa) et à sec. Dans ce cas, le matériau étudié est un acier inoxydable 316L (AISI) et l'outil de coupe utilisé est un outil standard qui n'est pas adapté à l'usinage des aciers inoxydables (TCMW16T304, nuance

H13 de Sandvik). Les résultats ont permis de mettre en évidence le rôle de chacun des paramètres mis en jeu avec notamment les conclusions suivantes:

- Le contrôle des copeaux est significativement amélioré. La fragmentation est rendue possible avec des plaquettes qui ne pouvaient jusqu'alors le permettre.
- Le niveau maximal des contraintes résiduelles superficielles diminue, alors que la profondeur affectée ne varie pas beaucoup en comparaison avec l'usinage à sec.

I.15.2.3. Usinage assisté champ magnétique

L'assistance magnétique (Fig. I.43) consiste à réaliser l'opération d'usinage dans un champ magnétique engendré par des sources de courant (ex. bobine) ou par des corps aimantés (ex. système de serrage magnétique).

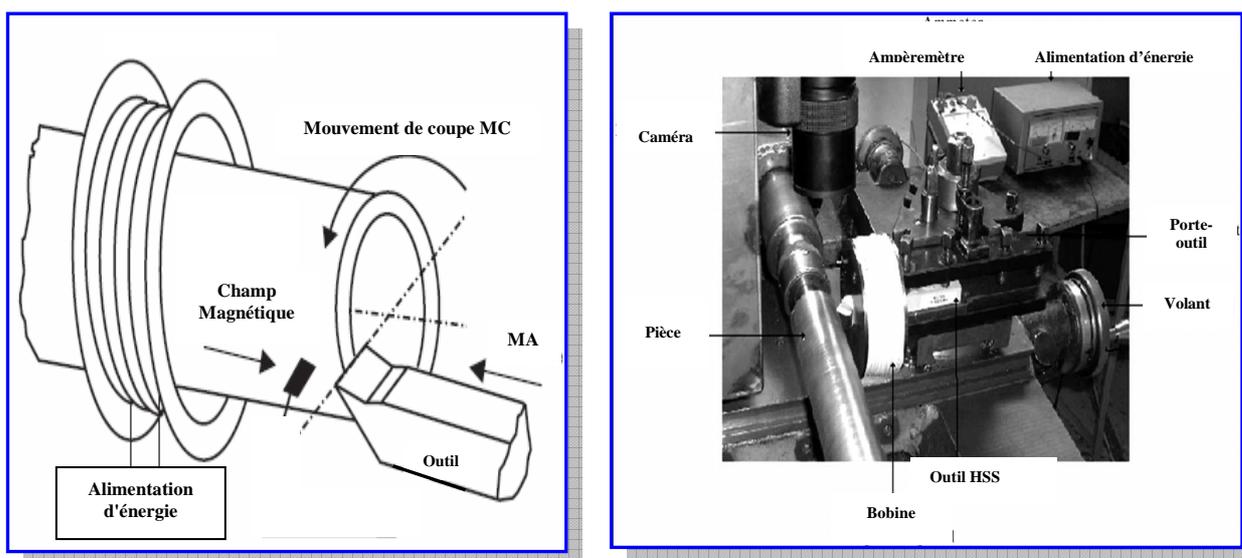


Fig. I.43. Schéma du dispositif d'assistance magnétique.

L'assistance magnétique permet de modifier la formation du copeau (position et morphologie de la zone primaire) et le contact outil-copeau (tribologie). Dans un acier C50, cela induit une diminution de l'usure de l'outil, une forte augmentation de la durée de vie de l'outil (multiplié par deux), mais favorise la formation d'arête rapportée. L'augmentation de la durée de vie de l'outil (usure plus faible) est peut être seulement due à la protection de l'arête de coupe par l'arête rapportée. Des essais de perçage sous assistance dans un acier S235 ont été réalisés par O.

Bataineh et al. Ils ont montré une diminution de 10 % de l'usure de l'outil et une augmentation de la température de coupe pendant l'assistance magnétique. Leur modélisation éléments finis du procédé montre que le champ magnétique se concentre au niveau de la couche superficielle du matériau, ce qui pourrait avoir pour effet de modifier son comportement mécanique ou la tribologie de la surface de la pièce.

I.15.2.4. Usinage assisté Laser

L'usinage assisté laser a vu le jour durant les années 80. Il consiste à chauffer d'une façon localisée la matière avec un spot laser (densité de puissance très importante) et utiliser en parallèle un outil de coupe pour usiner la matière. Ainsi, le laser est utilisé comme une source thermique servant à diminuer les caractéristiques du matériau à usiner juste avant la coupe et faciliter ainsi l'usinage à l'aide d'un outil coupant. L'usinage assisté laser peut être considéré comme étant un procédé alternatif pour l'usinage des matériaux durs (alliage de titane, acier à roulement, céramiques ...). L'effet du laser sur la coupe a été étudié par Germain et al. Des essais de chariotage avec et sans assistance laser ont été menés sur un acier à roulement 100Cr6 durci à 57 HRc. Après une comparaison avec les résultats obtenus en usinage classique, il montre que l'assistance laser permet de diminuer :

- Les efforts de coupe de 30 à 50 %,
- Les contraintes résiduelles en surface jusqu'à 70 %,
- La profondeur affectée par les contraintes résiduelles jusqu'à 70 %,

I.15.2.5. Assistance cryogénique

L'assistance cryogénique permet d'envoyer un jet d'azote liquide entre le copeau et l'outil (Fig. I.44). Cette technique est utilisée pour l'usinage de matériaux comme l'alliage de titane (Ti6Al4V). Pour ces matériaux, la température de coupe est très grande car le copeau n'évacue que très peu de chaleur. Cette température élevée affecte l'outil qui s'use très rapidement même à des vitesses de coupe faibles. L'assistance cryogénique permet donc d'évacuer l'énergie calorifique générée par la coupe.

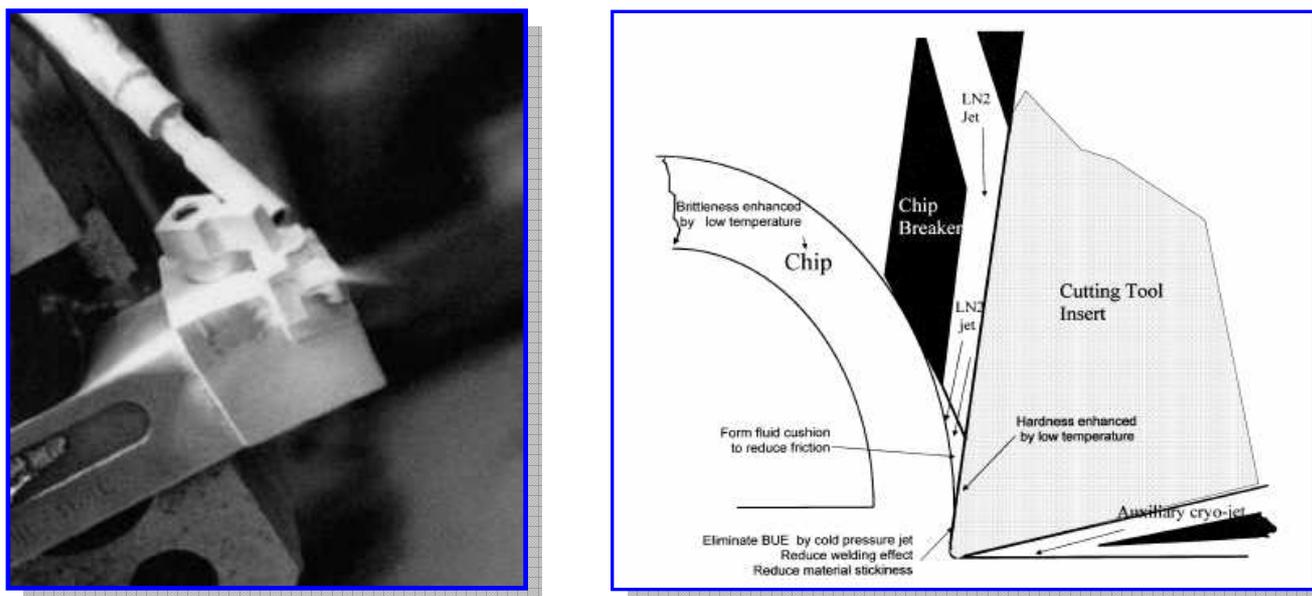


Fig. I.44. Dispositif d'assistance cryogénique.

I.15.2.6. Usinage assisté par ultrasons

L'assistance ultrasons en tournage (Fig. I.45) excite l'outil de coupe avec une fréquence de l'ordre de 15 à 20 kHz et une amplitude d'environ 10 à 20 μm suivant la direction axiale, radiale ou tangentielle.

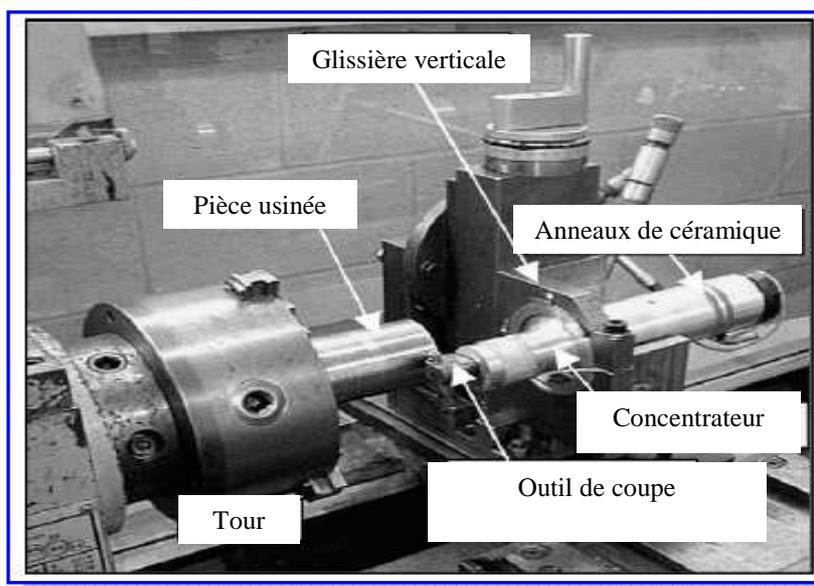


Fig. I.45. Dispositif d'assistance ultrason en tournage.

Des études récentes ont montré des améliorations sensibles de l'usinage avec l'assistance ultrasonore. Babitsky et al, ont obtenu, pour des alliages de nickel (NiCrCo20Mo - C263- et NiCr19FeNb -Inconel 718-) une amélioration de l'état de surface (diminution de 25 à 40 % du Ra et diminution de 40 % du Rt). De plus, les auteurs proposent un système d'excitation ultrasonore autorésonant permettant d'améliorer la commande de l'assistance. L'assistance ultrasonique n'a qu'une légère influence sur la microstructure des couches de surface (mesure de la couche écrouie par nano-indentation). Mais elle forme un copeau continu (déformation homogène du copeau sur sa longueur) et elle augmente la température de coupe d'environ 50 %. S. Chang montre une forte diminution des bavures pour les opérations de perçage assisté par ultrasons sur une pièce en aluminium pur. Des modélisations numériques du procédé assisté ultrason ont été mises en place pour montrer l'influence des vibrations sur la coupe.

I.15.2.7. Usinage par Electroérosion

L'usinage par électroérosion (ou EDM du terme anglais « Electrical Discharge Machining ») qui a la particularité d'usiner des matériaux sans égard à leur dureté, peut être appliqué à l'usinage des CMM, car ils sont conducteurs d'électricité. Poon et Lee pensent que l'usinage par électroérosion peut ouvrir de nouvelles portes pour l'usinage des CMM. En plus de la possibilité d'usiner des pièces de formes complexes et variées, l'électroérosion ne déforme pas les pièces et produit des surfaces sans ébavurages.

Selon Poon et Lee, le problème associé à l'électroérosion des CMM est que la matrice d'alliage d'aluminium est conductrice d'électricité mais les renforts (SiC par exemple) le sont beaucoup moins. Plus les CMM contiennent des particules, plus l'électrode va s'user. Par ailleurs, Gilmore a remarqué que les composites usinés par électroérosion accusent une diminution de leur résistance à la fracture, une surface endommagée par la chaleur pouvant s'étendre jusqu'à 50µm de profondeur, et des fissures.

Au terme de cette analyse portant sur l'utilisation des procédés non conventionnels pour l'usinage des CMM, il ressort que l'électroérosion et l'usinage par jet d'eau abrasif peuvent être utilisés dans le cas des pièces complexes. Mais, en raison de leur bas taux d'enlèvement de métal, ils ne sauraient être envisagés pour une grande production. De plus, le fini des pièces est moins bon que celui obtenu en usinant les CMM par procédés conventionnels.

I.16. Usinage des matériaux composites par enlèvement des copeaux

L'usinage des matériaux composites par enlèvement de matière est un domaine assez particulier. Bien qu'il y ait une relation entre conditions coupe et état des surface des matériaux composites, l'influence des endommagements induits par la coupe sur les propriétés mécaniques des pièces est peu étudiée. On peut expliquer cette tendance par le fait que les matériaux métalliques ne présentent pas de grandes dégradations de propriétés mécaniques en fonction des conditions d'usinage. Ainsi, seuls les états de surface et la respect des tolérances sont habituellement considérés. Pour les matériaux composites, la situation est néanmoins très différente. Dans ce qui suit, on entendra principalement par matériau composite, ceux constitués d'une matrice polymère.

I.17. Principales propriétés des composites impliquant des difficultés en usinage

Les caractéristiques des matériaux composites ayant une influence sur les opérations d'usinage sont les suivantes :

- Hétérogénéité : les matériaux composites sont constitués d'un polymère contenant un réseau de fibres en nappe, éventuellement tissées. Il faut donc usiner simultanément deux matières de natures différentes (résine et fibres).

- Anisotropie : dans le cas de composites à fibres orientés, on peut aussi avoir une structure anisotropie (comportement différent selon la direction envisagée), ce qui s'ajoute aux difficultés d'usinage. La rigidité, par exemple, sera plus grande dans le sens longitudinal des fibres que dans les sens perpendiculaire, ce qui peut à l'usinage, générer des déformations non souhaitées.

- Conductivité thermique : ce sont des matériaux isolants sauf ceux chargés de particules métalliques ou renforcés de fibres de carbone. La chaleur créée par l'opération d'usinage restant concentrée sur la zone usinée peut entraîner une déformation thermique importante et un risque de dégradation thermique.

- Usure des outils : la présence de fibres de verre engendre une usure très rapide des outils traditionnels (acier rapide). Les outils au carbure, voire diamantés, sont impératifs.

I.18. Dégradations provoquées par la coupe

En raison de l'hétérogénéité et de l'anisotropie, la coupe peut engendrer des endommagements qui vont influencer directement les propriétés mécaniques du matériau. Ces endommagements sont principalement de deux natures :

- ♦ Des initiations de fissures (microfissures en fraisage) ;
- ♦ Délaminage visible (arrachement d'une couche) ;
- ♦ Délaminage interne (dissociation de deux couches) ;
- ♦ Des dégradations thermiques en raison de la faible tenue thermique des polymères ;
- ♦ Arrachement de fibres.

Dès lors, il est essentiel d'avoir une idée claire du lien entre la présence de ces endommagements et la dégradation de tenue mécanique associée. Ce problème est difficile à résoudre car il introduit un nombre très important de paramètres (configuration d'usinage, type d'outil, paramètres de coupe, nature des fibres et de la matrice, nature des sollicitations mécaniques, difficulté de mettre en place des modèles). Cependant, ces endommagements n'influencent pas toujours le comportement mécanique des pièces usinées, cela dépend par la suite du mode de sollicitation appliquée à la pièce. Si la rupture a lieu loin des zones usinées ou si elle s'initie en compression (fermeture des fissures), les effets sont négligeables. Si la rupture s'initie au niveau des surfaces coupées, l'influence est significative, surtout si la rupture s'opère en traction transverse ou en cisaillement.

La coupe des composites est généralement accompagnée d'une lubrification dont les fluides sont :

- ♦ L'eau : sous forme de jet liquide continu ou vaporisé en fines gouttelettes ;
- ♦ Un mélange eau / huile soluble : dans la mesure où celle-ci ne réagit pas avec le matériau ;
- ♦ L'air : soit sous forme d'air comprimé soufflé, soit par aspiration ; dans ce deuxième cas, s'il s'agit d'usinage créant de la poudre ou des copeaux très petits, on a l'avantage de les récupérer dès leur formation par l'usinage.

L'usinage peut être effectué sans liquide de refroidissement, mais il est recommandé d'assurer dans tous les cas l'évacuation des copeaux à l'aide d'air comprimé. Pour une utilisation de ces

matériaux dans une application décorative, électrique ou frottante, il faut noter que l'usinage détruit la peau recouvrant le matériau à la suite de mise en œuvre, ce qui nuit à l'esthétique, mais peut aussi occasionner des reprises d'humidité diminuant les qualités électriques ou frottantes.

Autres paramètres à prendre en considération lors de l'usinage de matériaux composites :

- ♦ La conductibilité thermique des composites, inférieure à celle des métaux, oblige à limiter le plus possible la chaleur engendrée en diminuant la friction de l'outil.
- ♦ La respiration de la poussière issue de l'usinage de composites à base de fibres de verre est nuisible à la santé. Il faut donc prévoir des installations d'aspiration efficaces sur les machines et veiller à un nettoyage méticuleux après le travail.
- ♦ Il faut éviter toute déformation due au dispositif de fixation sur le bâti de machine.

On peut aussi remarquer des différences du comportement notables selon la nature des fibres :

- ♦ Stratifiés en fibres de verre ;
- ♦ Stratifiés en fibres de carbone ;
- ♦ Stratifiés en fibres d'aramide ;
- ♦ Stratifiés cellulosique.

I.19. Outils employés pour la coupe des composites

Pour l'usinage par enlèvement de copeaux, on emploie principalement des outils :

- En acier rapide : ils sont les moins chers à l'achat mais ils ont une durée de vie moins longue, surtout avec les matériaux renforcés de fibres de verre. Leur qualité de coupe est bonne à moyenne. L'acier rapide est un acier allié comportant du carbone, du chrome et tungstène, parfois du molybdène, de vanadium et du cobalt.

- En carbure : ils ont une plus grande résistance à l'abrasion que les aciers rapides et sont d'un bon rapport prix / usure. Les carbures métalliques sont obtenus par frittage. L'outil peut être entièrement en carbure ou, plus souvent (car moins cher), constitué d'une plaquette rapportée et fixée sur un support métallique classique.

- Diamantés : ce sont le plus chers mais pour certains usinages, par exemple une grande série de pièces en composites fortement renforcés en fibres de verre qui génèrent une usure rapide de l'outil, le coût global de l'usinage peut être inférieur à celui d'un usinage avec une autre nature

d'outil. Ils sont souvent constitués de grains de diamants fixés sur un support. Les dimensions et la concentration des grains ainsi que la nature du support sont à prendre en compte dans le choix d'un outil.

- Revêtements spéciaux anti-usure : de nombreux développements sont en cours pour mettre au point des outils plus résistants à l'usure. Il existe ainsi des revêtements déposés sur les outils en acier qui prolongent la durée de vie de manière très sensible. Ce sont des revêtements à base de nitrure de titane, par exemple, qui multiplieraient par 2 à 5 la durée de vie d'un outil de fraisage.

I.20. Usinage des structures sandwich

Par rapport aux matériaux composites classiques, la difficulté est encore amplifiée avec ce type de structure puisque dans ce cas là, il faut couper le stratifié de la peau (fibres et résine) et la mousse plastique ou le nid-d'abeilles métallique, voire le panneau de bois, en même temps. Chaque type de matériau est particulier et il est donc recommandé d'accomplir quelques essais préliminaires sur des échantillons de matière. L'opération la plus fréquemment menée sur ce type de matériau, est le perçage des structures sandwich, cas qui ne sera pas abordé, cette étude se limitant aux cas du tournage et du fraisage.

Bibliographie

- [1] J.P. PIEROZAK, *COUPE DES METAUX*, Edition Office des Publications Universitaires, 1994.
- [2] D. GELIN, M. VINCENT, *ELEMENTS DE FABRICATION*, Edition ellipses 1995.
- [3] C.BARLIER, B. POULET, *MEMOTECH, PRODUCTION MECANIQUE*, Génie Mécanique, 2^{ème} Edition, Paris, Casteilla Ed, 1999.
- [4] W.BOUZID SAI, *USINAGE (PROCEDES ET METHODES)*, centre de publication Universitaire, Tunisie, 2002.
- [5] A.CAMPA, *TECHNOLOGIE PROFESSIONNELLE GENERALE POUR LES MECANICIENS*, Tome I, Edition Foucher, Paris 1970.
- [6] A. BOUCOU, M. CALIEZ, F. MOREAU, *ETAT DE L'ART SUR LA MODELISATION DE COUPE*, Laboratoire de Mécanique et Rhéologie, Mars 2004.
- [7] M.REMADNA, *LE COMPORTEMENT DU SYSTEME USINANT EN TOURNAGE DUR. APPLICATION DU CAS D'UN ACIER TREMPE USINE AVEC DES PLAQUETTES CBN (NITRURE DE BORE CUBIQUE (2001)*. thèse de doctorat en Génie Mécanique, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [8] G. GERMAIN. *CONTRIBUTION A L'OPTIMISATION DU PROCEDE D'USINAGE ASSISTE LASER (2006)*, thèse de doctorat en Mécanique, Matériaux et Procédés, Ecole National Supérieure d'Arts et Métiers d'Angers.
- [9] G. LIST, *ETUDE DES MECANISMES D'ENDOMMAGEMENT DES OUTILS CARBURE WC-CO PAR LA CARACTERISATION DE L'INTERFACE OUTIL-COPEAU. APPLICATION A L'USINAGE A SEC D'ALLIAGE D'ALUMINIUM AERONAUTIQUE AA2024 T351 (2004)*, thèse de doctorat en Mécanique, Matériaux et Procédés, Ecole National Supérieure d'Arts et Métiers de Bordeaux.
- [10] E. MERCHANT, *MECHANICS OF THE METAL CUTTING PROCESS, I ORTHOGONAL CUTTING AND A TYPE 2 CHIP*, Journal of applied Physics, Vol. 16 (1945), 267-275.

- [11] E. MERCHANT, *MECHANICS OF THE METAL CUTTING PROCESS, I ORTHOGONAL CUTTING*, Journal of applied Physics, (1945), 318-324.
- [12] R. KOMANDURI, T.H. BROWN, *THE MECHANICS OF THE CHIP SEGMENTATION IN MACHINING*. Journal of Engineering for Industry, (1981). Vol. 103, N° 1, 33-51.
- [13] M. HABAK, *ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA MICROSTRUCTURE ET DES PARAMETRES DE COUPE SUR LE COMPORTEMENT EN TOURNAGE DUR DE L'ACIER A ROULEMENT 100 Cr6* (2006), thèse de doctorat en Mécanique, Matériaux et Procédés, Ecole National Supérieure d'Arts et Métiers d'Angers.
- [14] V.I. BABITSKY, A.N. A.V. MITROFANOV, V.V. SILBERSCHMIDT, *ULTRASONICALLY ASSISTED TURNING OF AVIATION MATERIALS: SIMULATIONS AND EXPERIMENTAL STUDY*, Ultrasonics, 42 (2004), 81 – 86.
- [15] V.I. BABITSKY, A.N. KALASHNIKOV, F. V. MOLODTSOV, *AUTORESONANT CONTROL OF ULTRASONICALLY ASSISTED CUTTING*, Mechatronics, 14 (2004), 91-114.
- [16] S. CHANG, G. BONE, *BURR SIZE REDUCTION IN DRILLING ULTRASONIC ASSISTANCE*, Robotics and Computer-Integrated Manufacture, 21 (2005), 442-450
- [17] A.V. MITROFANOV, N. AHMED, V.I. BABITSKY, V.V. SILBERSCHMIDT, *EFFECT OF LUBRICATION AND CUTTING PRAMETERS ON ULTRASONICALLY ASSISTED TURNING OF INCONEL 718*, Journal of Materials Processing Technology, 162-163 (2005), 649-654.
- [18] P. DAHLMAN, M. ESCURSELL, *HIGH-PRESSURE JET-ASSISTED COOLING: A NEW POSSIBILITY FOR NEAR NET SHAPE TURNING OF DECARBURIZED STEEL*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 44, 10-115 (2004).
- [19] M. HABAK, C. FISCHER, J-L. LEBRUN, *ROLE DE L'ASSISTANCE JET D'EAU HAUTE PRESSION SUR LES CONTRAINTES RESIDUELLES DES PIECES EN ACIERS INOXYDABLE AUSTENITIQUE USINE*. Journée du GFAC/SF2M, ENSAM Aix en Provence (2004).
- [20] R.KOVACEVIC, C. CHERUKUTHOTA, M. MAZURKIEWICS, *HIGH-PRESSURE WATER JET COOLING/LUBRICATION TO IMPROVE MACHINING EFFICIENCY IN MILLING*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 35, N°10, 1459-1473 (1995).

- [21] J. KAMANSKI, B. ALVELID, *TEMPERATURE REDUCTION IN THE CUTTING ZONE IN WATER-JET ASSISTED TURNING*. Journal of Materials Processing Technology, 106 (2000), 68-73.
- [22] C. SHET, X. DENG, A. BAYOUME, *FINITE ELEMENT SIMULATION OF HIGH-PRESSURE WATER JET ASSISTED METAL CUTTING*. International Journal of Mechanical Sciences, 45 (2003), 1201-1228.
- [23] M. EL MANSORI, F. PIERRON, D. PAULMIER, *REDUCTION OF TOOL WEAR IN METAL CUTTING USING EXTERNAL ELECTROMOTIVE*, Surface and Coatings Technology. 163-164 (2003) 472-477.
- [24] M. ELMANSORI, V. LORDACHE, P. SEITIER, D. PAULMIER, *IMPROVING SURFACE WEARING OF TOOLS BY MAGNETISATION WHEN CUTTING DRY*, Surface & Coatings Technology, 188-189 (2004), 566-571.
- [25] M. ELMANSORI, B. KLAMECKI, *MAGNETIC FIELD EFFECTS IN MACHINING PROCESSES AND ON MANUFACTURED PART MECHANICAL CHARACTERISTICS*, Journal of Manufacturing Sciences and Engineering, 128 (2006), 136-145..
- [26] O. BATAINEH, B. KLAMECKI, B. KOEPKE, *EFFECT OF PULSED MAGNETIC TREATMENT ON DRILL WEAR*, Journal of Materials Processing Technology. 134 (2003) 190-196
- [27] B. LESOURD, *ETUDE ET MODELISATION DES MECANISMES DE FORMATION DE BANDES DE CISAILLEMENT INTENSE EN COUPE DES METAUX, APPLICATION AU TOURNAGE ASSISTE LASER DE L'ALLIAGE DE TITANE TA6V*, Thèse de l'EC de Nantes, ED 82-174 (1996).
- [28] G. GERMAIN, F. MOREL, J-L. LEBRUN, A.MOREL, B. HUNEAU, *SURFACE HEAT TREATMENT DUE TO LASER MACHINING AND THE RELATIVE EFFECTS ON FATIGUE STRENGTH*, AT3S, Journées Europeennes, Strasbourg, 22-23 Mars 2006.
- [29] S. Y. HONG, I. MARKUS, W. JEONG, *NEW COOLING APPROACH AND TOOL LIFE IMPROVEMENT IN CRYOGENIC MACHINING OF TITANIUM ALLOY Ti-6AL-4V*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 41, 2245-2260 (2001).
- [30] SK. POON, TC. LEE, *ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF PARTICULE METAL-MATRIX COMPOSITES*, Proc. Of Conf. ASM 1993 Materials Congress, Materials Week'93, Pittsburgh, Pennsylvania, Oct. 17-21, p.43-50.

- [31] H.R. LEEP, D. L. HERDE, PRODUCTION DRILLING MODELS FOR A COMPOSITE MATERIAL, *Machining of Composite Materials II*, Proc. of the ASM 1993, Materials Congress, Pittsburgh, Pennsylvania, Oct. 17-21, p.132-135.
- [32] R; GILMORE, *ULTRASONIC MACHINING OF CERAMIC-MATRIX AND METAL MATRIX COMPOSITES*, Proc, of the ASM 1993, Materials Congress, Pittsburgh, Pennsylvania, Oct. 17-21, p.132-135.
- [33] V. SONGMENE, *USINAGE DES COMPOSTES A MATRICE D'ALLIAGE D'ALLUMINIUM GrA-Ni^R* (2000), thèse de doctorat en Philosophie, Ecole Polytechnique de Montréal.
- [34] P. MARTIN, J. RICHARD, M. VERON, *THE INFLUENCE OF CUTTING SPEED VARIATIONS ON TOOL WEAR FOR OPTIMAL CONTROL OF MACHINING*. *Annals of the CIRP*, 1979, Vol 28, N° 1, 7-11.
- [35] A.BER, M. GOLDBLAT, *THE INFLUENCE OF THE TEMPERATURE GRADIENT ON CUTTING TOOL'S LIFE*. *Annals of the CIRP*, 1989, Vol 381, N° 1, 69-73.
- [36] C. PAGES, *COMPORTEMENT DE REVETEMENT CERAMIQUES SUR OUTIL EN TOURNAGE A SEC DE FINITION* (2003). thèse de doctorat en Mécanique, Ecole Centrale de Lyon.
- [37] C. BERDIN, *GENERALITES SUR LA COUPE DES METAUX*. Conférences CAST, Lyon, INSA de Lyon 1971, 5-71.
- [38] J.C. LEMAIRE, W.A. BACKOFFEN, *ADIABATIC INSTABILITY IN THE ORTHOGONAL CUTTING OF STEEL*. *Metall. Trans.* 1972.
- [39] R. KOMANDURI, R. H. BROWN, *THE MECHANICS OF CHIP SEGMENTATION IN MACHINING*. *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1987.
- [40] E.M. TRENT, P. K. WRIGHT, *METAL CUTTING*. BUTTERWORTH-HEINERMANN. 4th Edition, 2000.
- [41] E.M. TRENT, *CUTTING STEEL AND IRON WITH CEMENTED CARBIDE TOOLS*. Part II, *Journal of the Iron and Steel Institute* (1963), 923-932.
- [42] H. O. GEKONDE, S. V. SUBRAMANIAN, *TRIBOLOGY OF TOOL-CHIP INTERFACE AND TOOL WEAR MECHANISMES*. *Surface and Coatings Technology*, Vol.149 (2002), 151-160.
- [43] S. LO. CASTO, E. LO. VALVO, E. LUCCHINI, S. MASCHIO, M. PIACENTINI, V. F. RUISI, *CERAMIC MATERIALS WEAR MECHANISMS WHEN CUTTING NIKEL-BASED ALLOYS*. *Wear*, Vol.225-229, (1999), 227-233.

- [44] L. MATHIEN, M. RABOYEAU, *PRODUCTION MECANIQUE- FABRICATION MECANIQUE*. Dundee, Edition (1986).
- [45] V.L Al'shits et al, Kristallografiya. *SOV. PHYS. CRYSTALLOGR.* 35, (1990), 597.
- [46] H. ZAIDI, M.AMIRAT, J. FRENE, T. MTHIA, D. PAULMIER, *MAGNETOTRIBOLOGY OF FERROMAGNETIC/ FERROMAGNETIC SLIDING COUPLE*, *WEAR*, 263,2007, 1518-1526.
- [47] K.J. CHIN, H. ZAIDI, M.T. NGUYEN, P.O. RENAULT, *TRIBOLOGICAL BEHAVIOR AND SURFACE ANALYSIS OF MAGNETIZED SLIDING CONTACT XC48 STEEL / XC48 STEEL*, *Wear*, 250, (2001), 470-476.
- [48] M.K. MUJU, A. GHOSH, *EFFECT OF A MAGNETIC FIELD ON DIFFUSIVE WEAR OF CUTTING TOOLS*. *Wear*, 58, (1980), 49-58.
- [49] K. HIRATSUKA, T. SASADA, S. NOROSE, *THE MAGNETIC EFFECT ON WEAR OF METALS*. Proceeding of the JSLE, International Tribology Conference, July 8-10, Tokyo, Japan, (1985), 159-163.
- [50] T. SASADA, K. HIRATSUKA, H. SAITO, *WEAR*, 160, (1993), 119-123.
- [51] P.K. BAGCHI, *EFFECT OF MAGNÉTISATION ON THE WEAR CHARACTERISTICS OF CUTTING TOOLS*, *Indian J. Technol.* (1970), 264-269
- [52] P.K. BAGCHI, A. GHOSH, *MECHANISMS OF CUTTING TOOL WEAR IN THE PRESENCE OF A MAGNETIC FIELD*, *Indian J. Technol.* (1971), 165-168
- [53] M.K. MUJU, A. GHOSH, *EFFECT OF MAGNETIC FIELD ON WEAR*, *ASME. 75-PT-5*, (1975)
- [54] M.K. MUJU, A. GHOSH, *EFFECT OF MAGNETIC FIELD ON WEAR MODEL OF ADHESIVE WEAR IN THE PRESENCE OF A MAGNETIC FIELD*, *Wear.* 41, (1977), 103-16