

CHAPITRE. I. Analyse de la formation du copeau

CARACTERISATION DE LA COUPE DES METAUX

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

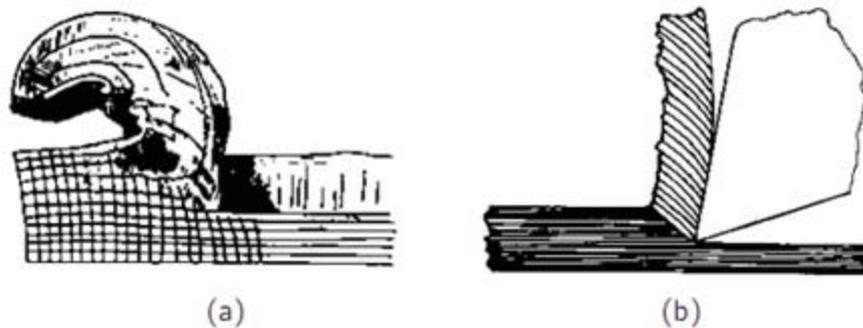


Figure.I.1. Observations de la coupe des métaux (d'après Tresca et Mallock).[1]

Définitions :

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

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

PHENOMENES PHYSIQUES EN USINAGE

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

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

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

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

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

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

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

FORMATION DU COPEAU

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

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

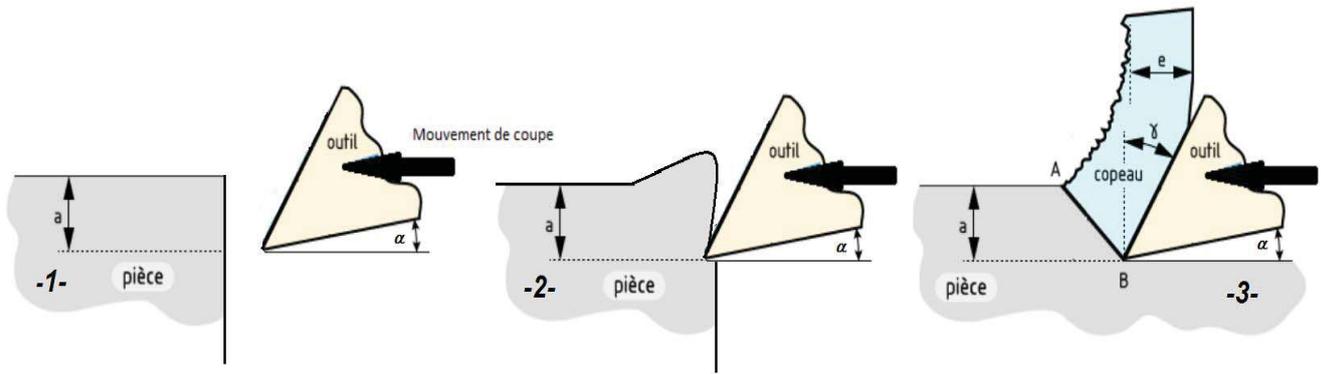


Figure.I.2. Etapes de formation de copeau [cours-et-exercices.com]

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

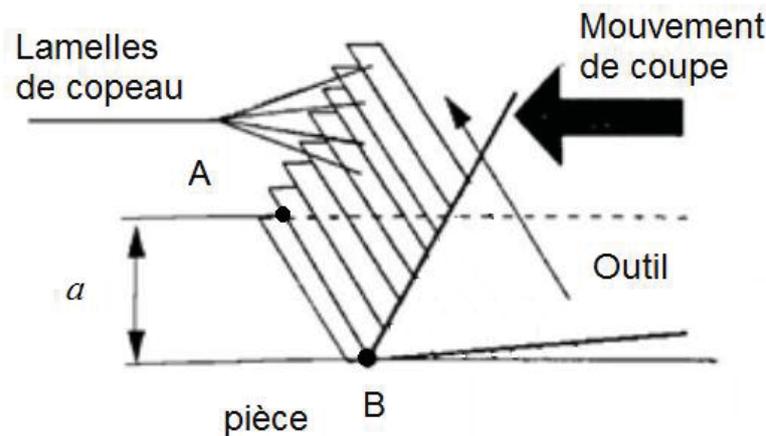


Figure.I.3. Formation de copeau - analogie du paquet de cartes [cours-et-exercices.com]

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

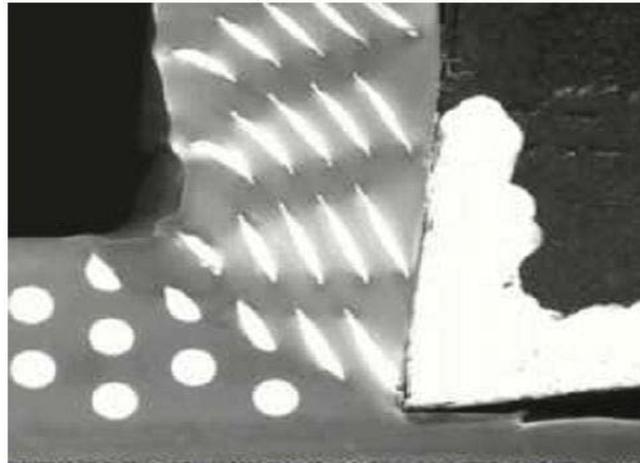


Figure.I.4. Déplacement et déformation des grain monocristallin en coupe orthogonale.

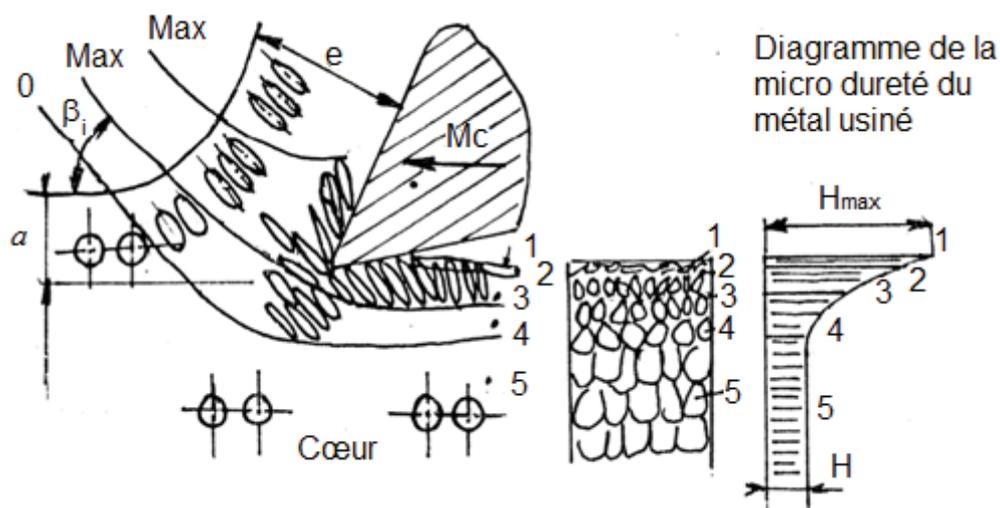


Figure.I.5. Formation de copeau à l'échelle cristalline.[5]

ZONES D'ELABORATION DU COPEAU

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

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

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

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

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

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

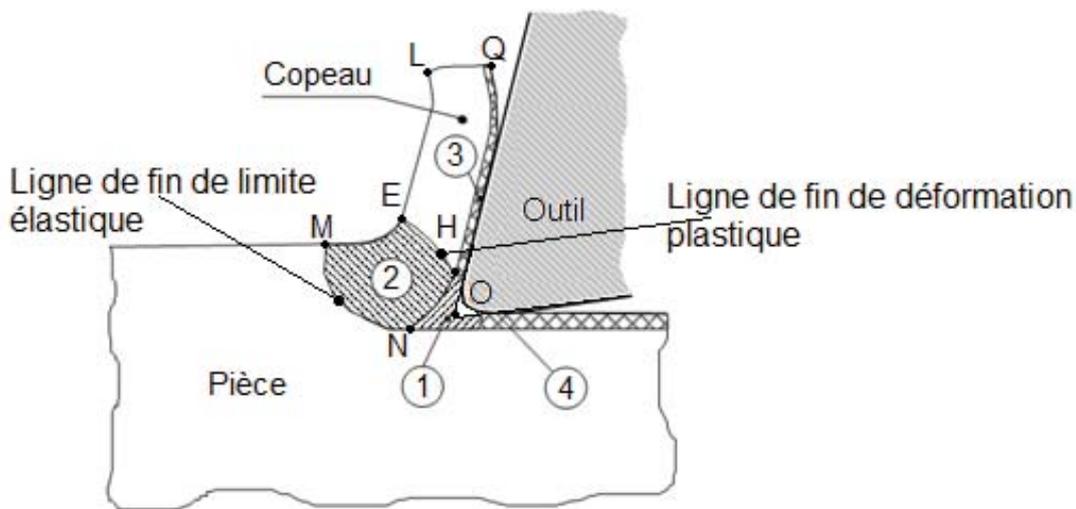


Figure.I.6. Observation des zones en coupe orthogonale [6,7]

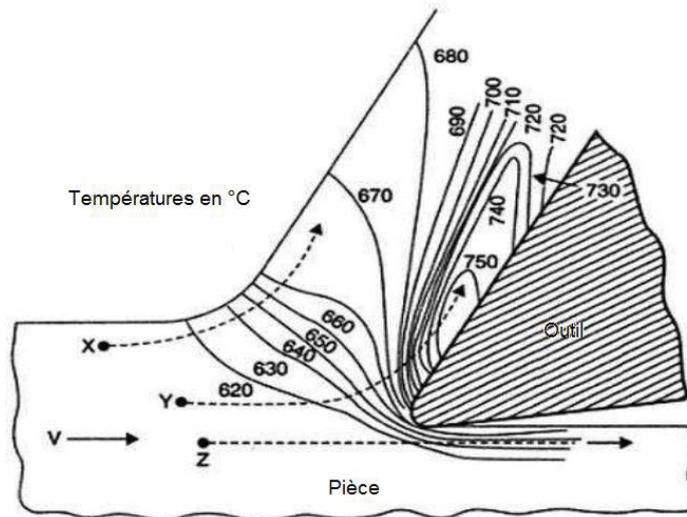


Figure.I.7. Distribution des températures en coupe orthogonale [11]

FORMES DU COPEAU EN USINAGE

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

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

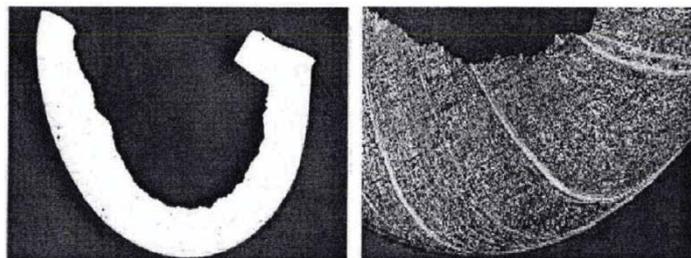


Figure.I.8. Copeau continu à surface lisse sans bande de cisaillement et copeau continu à surface lisse avec bande de cisaillement (d'après Heim 96, Sutter 97 et Faure 98). [12]

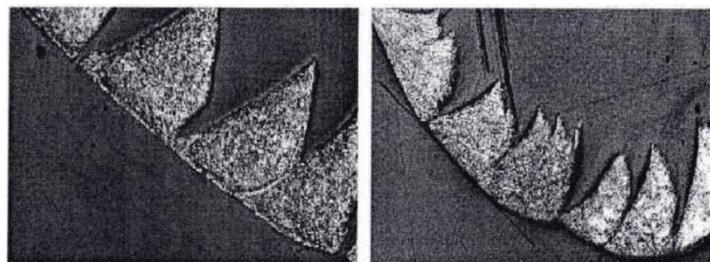


Figure.I.9. Copeau segmenté régulier et copeau segmenté irrégulier (d'après Heim 96, Sutter 97 et Faure 98). [12]

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

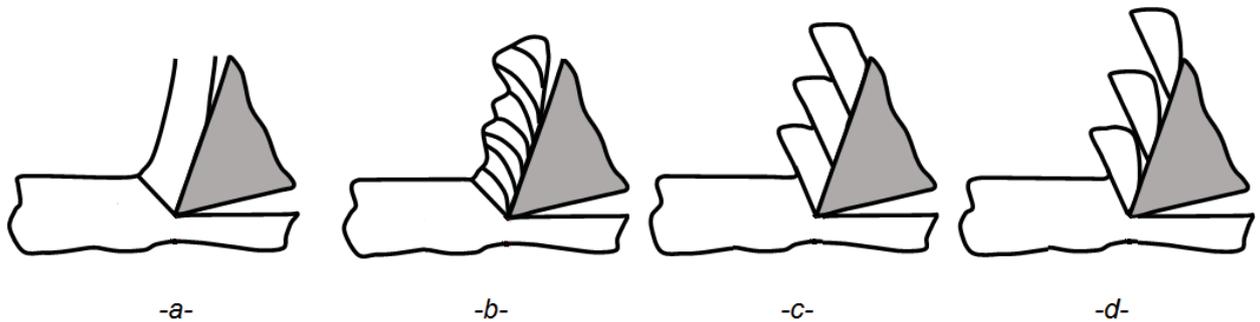


Figure.I.10. Formes de copeau en coupe orthogonale : a) copeau continu, b) copeau ondulé, c) copeau segmenté, d) copeau fragmenté (d'après Wagner 12). [4]

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

Coupeaux continus

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

Coupeaux discontinus

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

Une norme a été établie pour classer les copeaux obtenus en usinage, tableau I.1 (NFE 66 505).

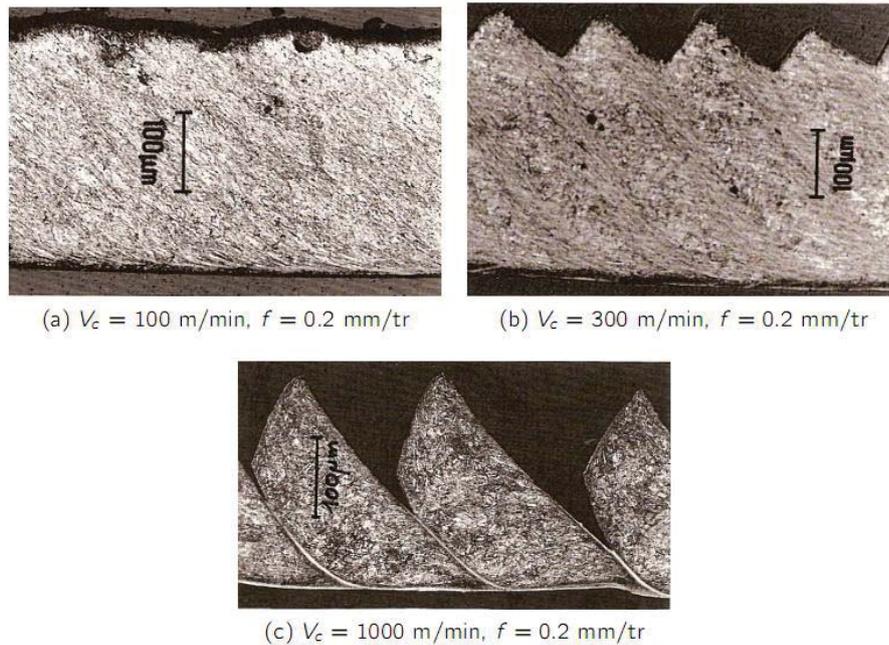


Figure.I.11. Copeaux obtenus à différentes vitesses de coupe (a) continu, (b) faiblement discontinu et (c) fortement discontinu (d'après Le Calvez 95).[1]

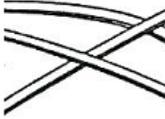
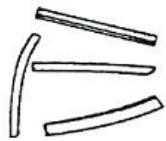
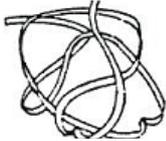
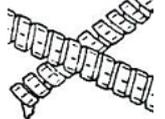
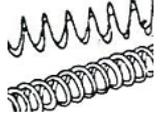
Remarque I.1

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

et il faut éviter :

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

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

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

Références

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