

# Chapitre I : Analyse de la formation du copeau

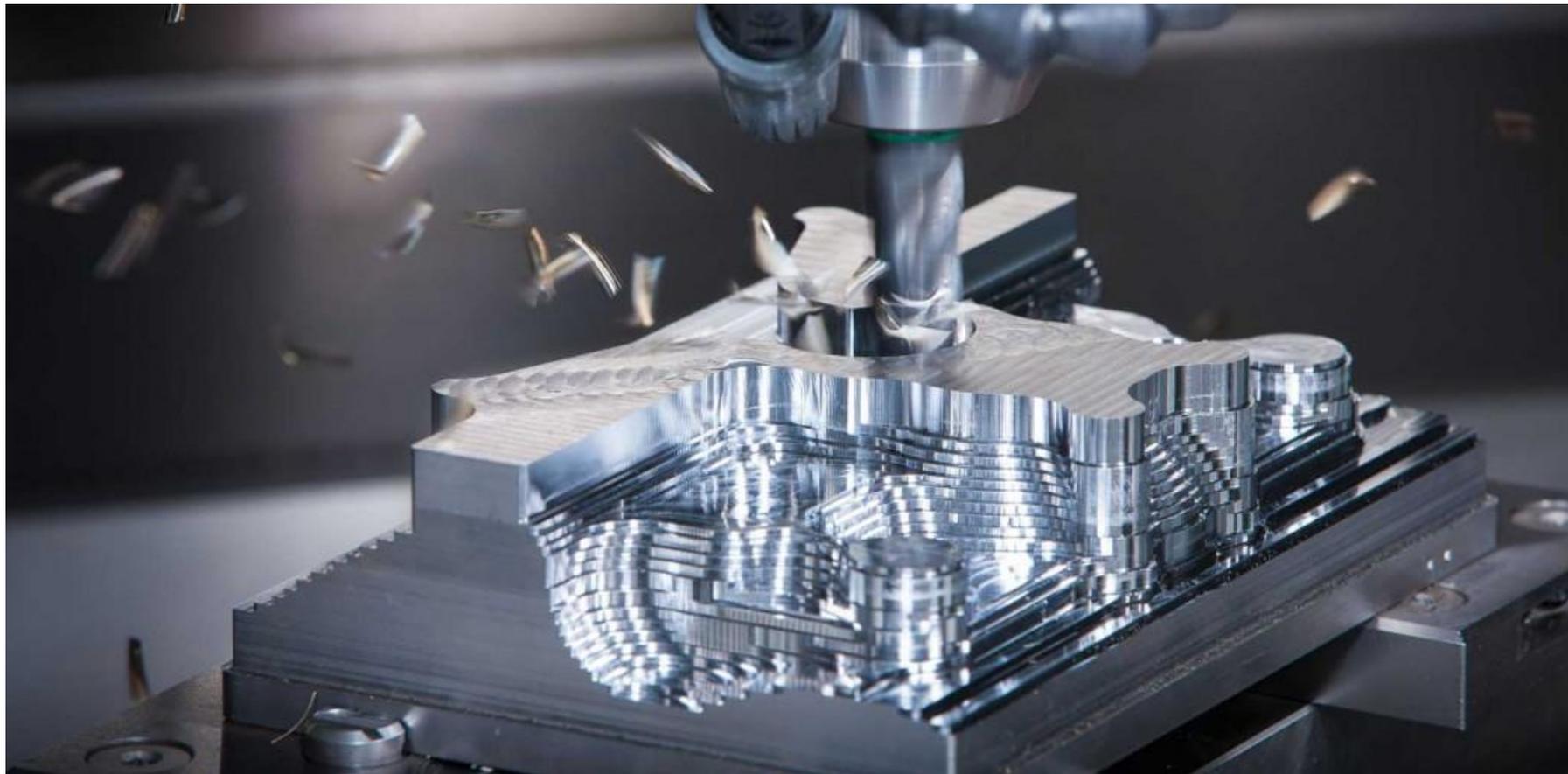
## Introduction :

Dans le contexte de l'usinage, un copeau est un morceau de matériau qui est enlevé d'une pièce à usiner par un outil de coupe. L'analyse de la formation de copeau est l'étude des mécanismes qui gouvernent la formation des copeaux. C'est un domaine de recherche important en usinage, car il peut aider à améliorer l'efficacité et la productivité des opérations d'usinage.

L'analyse de la formation de copeau est un processus complexe et il existe de nombreux facteurs qui peuvent l'influencer. Certains des facteurs les plus importants sont les suivants :

- Les propriétés du matériau de la pièce à usiner
- La géométrie de l'outil de coupe
- Les conditions de coupe (telles que la vitesse, l'avance et la profondeur de coupe)
- Les conditions de lubrification











SCLQL1212H09



SDNGN1212H11



SDJGR1212H11



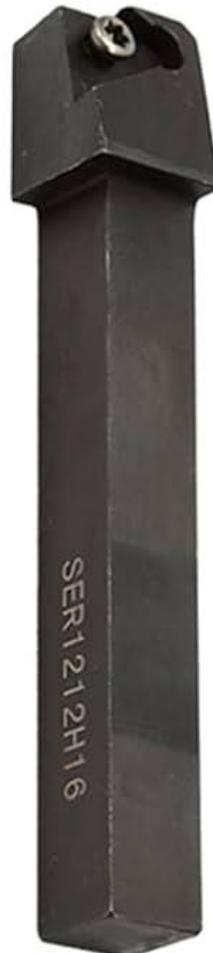
SQCR1212H09



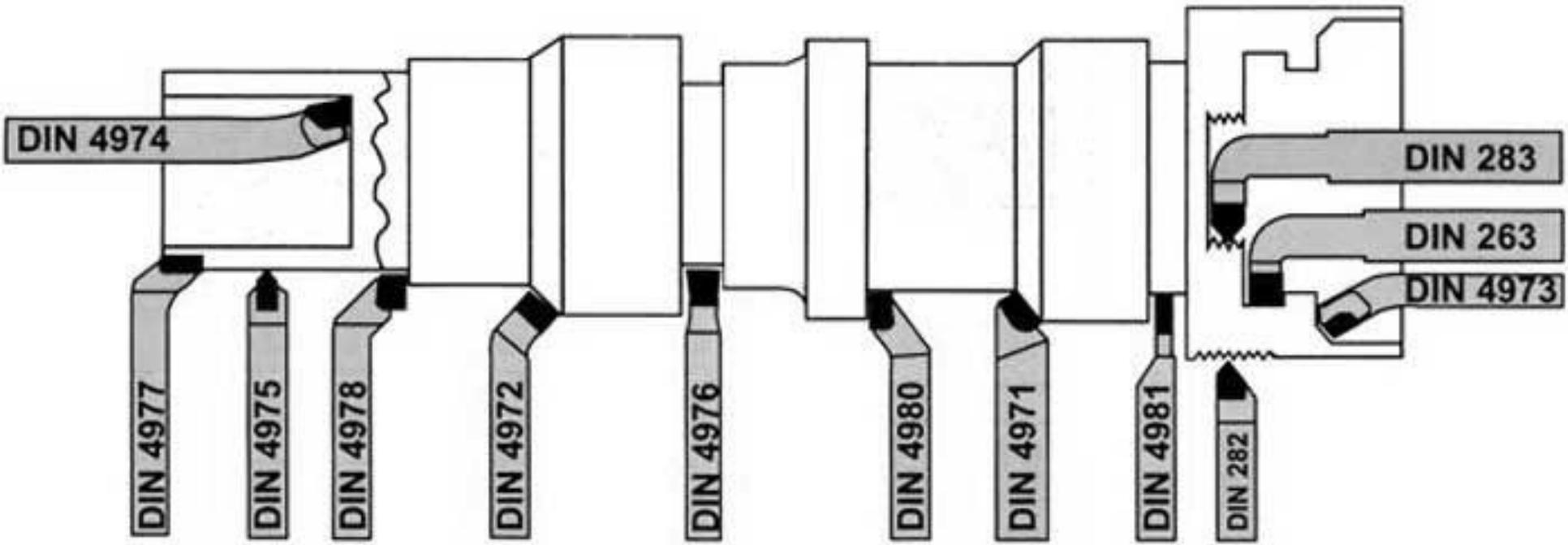
STGCR1212H11



MGEHR1212-2



SER1212H16





L'analyse de la formation de copeau peut être réalisée à l'aide de diverses méthodes, y compris l'analyse théorique, les essais expérimentaux et la simulation numérique. Les résultats de l'analyse peuvent être utilisés pour concevoir des outils de coupe plus efficaces et pour optimiser les conditions de coupe.

## 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 1b). 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]

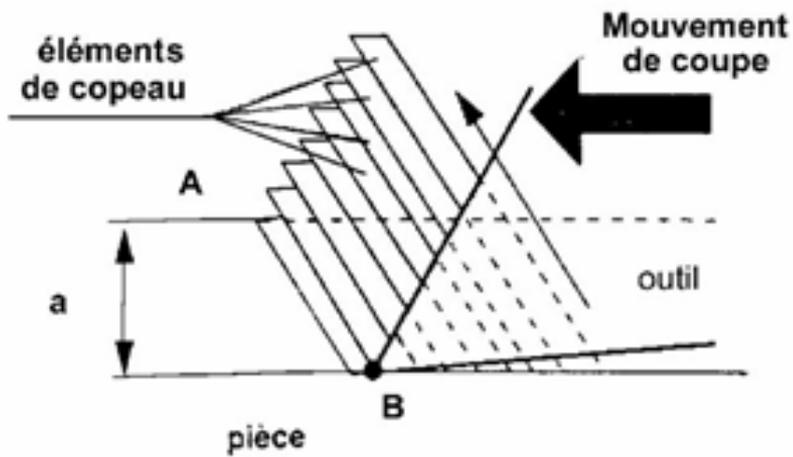
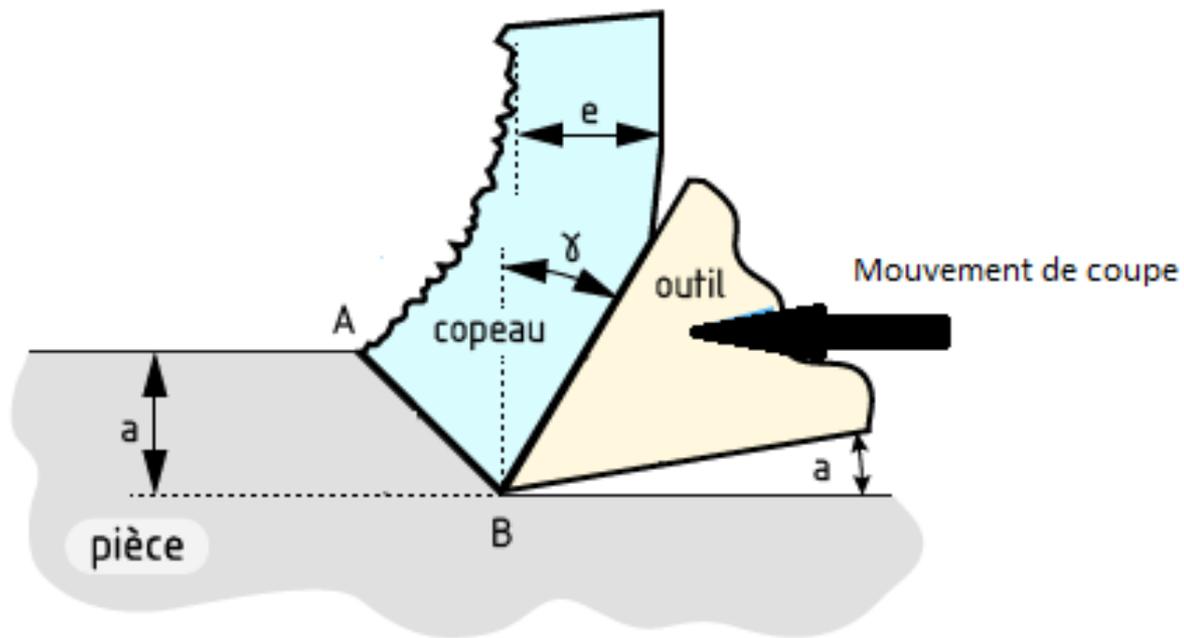


Figure 1 : Observations de la coupe des métaux

## Définitions :

La coupe des métaux est l'opération qui consiste à enlever de la matière à un matériau métallique, généralement sous forme de copeaux, afin de lui donner une forme ou une dimension souhaitée. Cette opération est réalisée à l'aide d'un outil coupant, qui est en contact avec la pièce à usiner.

Cette définition peut être développée de la manière suivante :

- **L'interaction entre l'outil et la pièce à usiner** : l'outil coupant est constitué d'une ou plusieurs arêtes tranchantes qui pénètrent dans la matière à usiner. La force d'avance, appliquée à l'outil, permet d'arracher des copeaux de la pièce.
- **Des résidus (déchets) appelés copeaux** : les copeaux sont les fragments de matière métallique qui sont arrachés de la pièce à usiner. Ils peuvent être de différentes formes et tailles, en fonction du type d'usinage et des paramètres de coupe.
- **Au contact de l'outil en mouvement et la pièce brute où semi-finie, commence l'écoulement du copeau** : l'écoulement du copeau est un phénomène complexe qui est influencé par de nombreux facteurs, tels que la géométrie de l'outil, la vitesse de coupe, la profondeur de passe et la nature du matériau usiné.

Voici quelques éléments supplémentaires qui peuvent être ajoutés à la définition :

- **Les différents procédés d'usinage** : il existe de nombreux procédés d'usinage, qui diffèrent par la forme de l'outil, la direction de l'avance et la nature de la force de coupe. Les principaux procédés d'usinage sont le tournage, le fraisage, le perçage, l'alésage, le taraudage, le meulage et le rabotage.
- **Les paramètres de coupe** : les paramètres de coupe sont les variables qui influencent le processus d'usinage. Ils comprennent la vitesse de coupe, la profondeur de passe, l'avance (le régime de coupe).
- **Les forces d'usinage** : les forces d'usinage sont les forces qui s'appliquent lors de l'usinage. Elles comprennent la force de coupe, la force de pression et la force de réaction.
- **Les contraintes d'usinage** : les contraintes d'usinage sont les contraintes qui s'appliquent au matériau usiné. Elles peuvent entraîner des déformations ou des ruptures de la pièce.

La coupe des métaux est un processus complexe qui nécessite une bonne compréhension des principes physiques et mécaniques impliqués. Elle est une opération essentielle dans la fabrication mécanique, car elle permet de produire des pièces de formes et de dimensions variées.

## La formation de copeaux

La surépaisseur de matière à enlever c'est la couche qui va former le copeau sous l'action mécanique complexe d'un outil de coupe, 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 la 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 2)

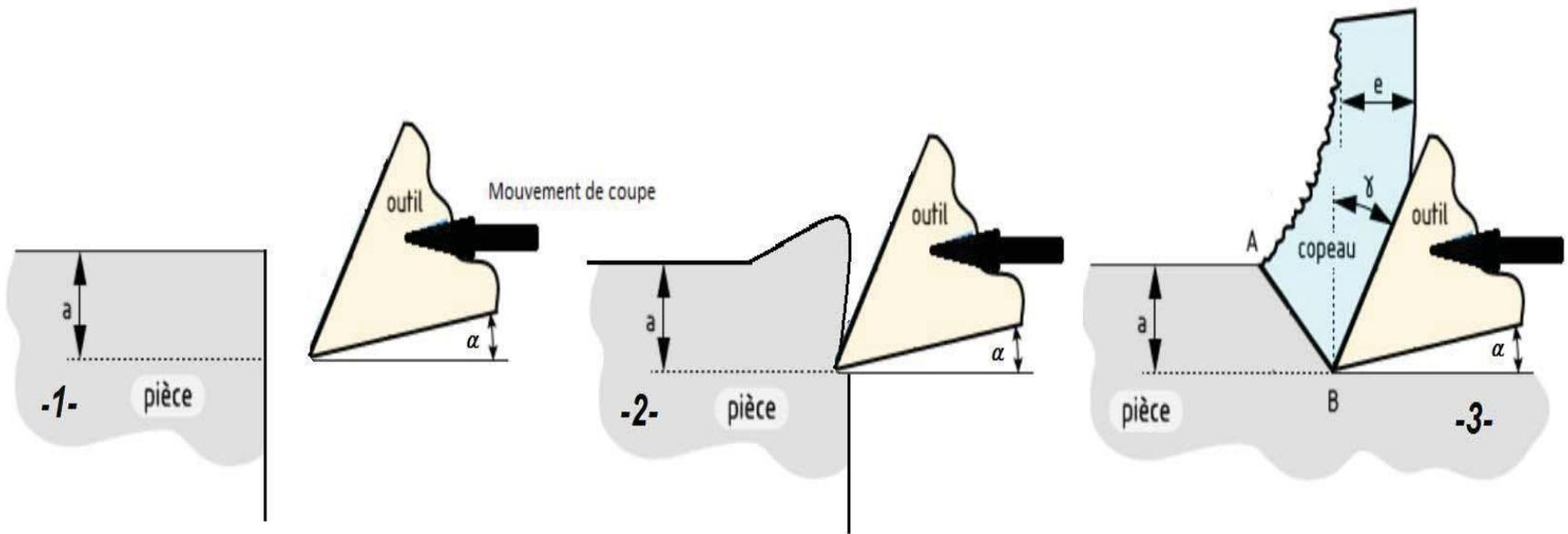


Figure 2 : Etapes de formation de copeau [cours-et-exercices.com]

La plupart des recherches sur la coupe orthogonale ont conclu que le copeau se compose de lamelles de matériau orientées de manière précise. La séparation du copeau par rapport à la pièce se produit grâce à un phénomène de cisaillement entre deux lamelles adjacentes au niveau des bords de l'outil (B). Le plan de cisaillement des lamelles du copeau suit la droite AB. Une fois que la coupe est amorcée, ce processus se répète à mesure que l'outil avance le long de la pièce. Le copeau se détache et glisse le long de la face de coupe de l'outil, où il est ensuite évacué. La trajectoire de l'outil par rapport à la surface de la pièce en cours d'usinage crée la forme finale de la surface usinée.

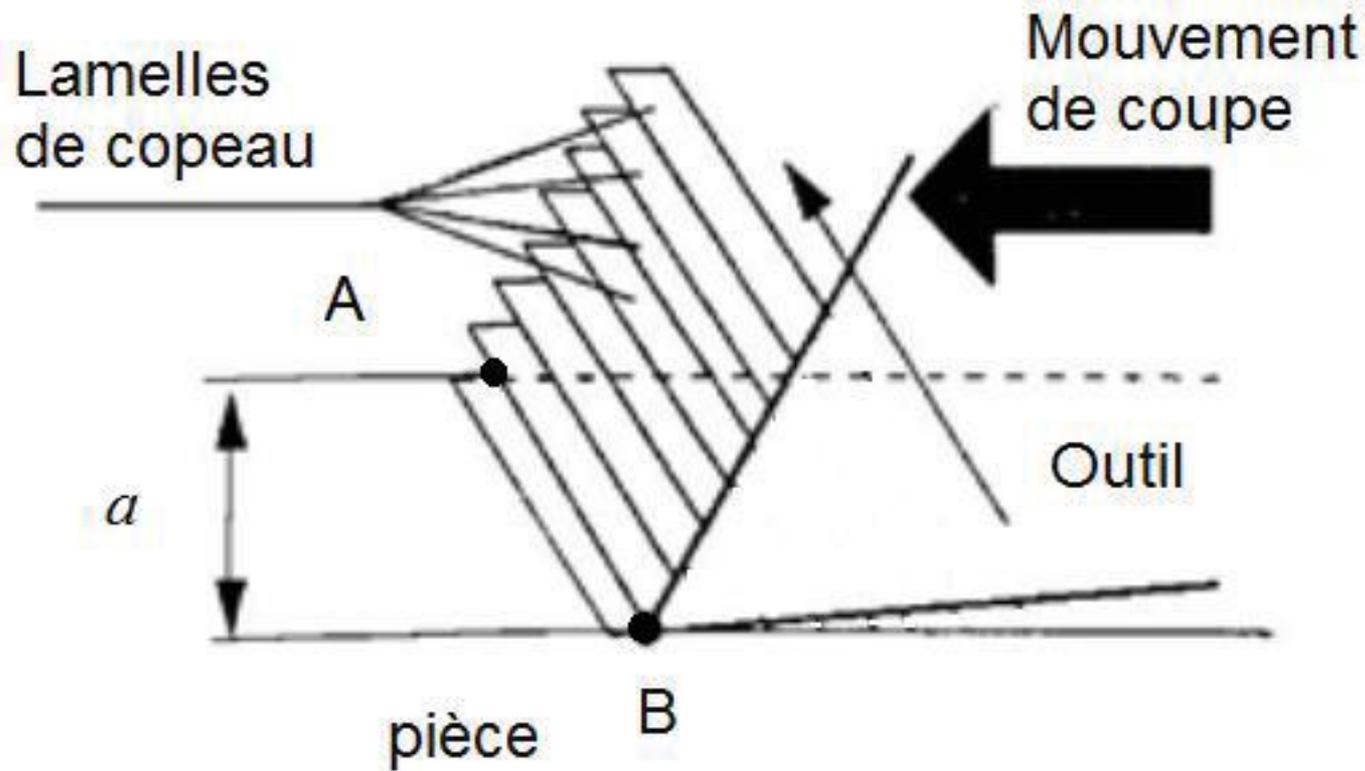


Figure 3. Formation de copeau - analogie du paquet de cartes [cours-et-exercices.com]

Au niveau microscopique ou à l'échelle d'un grain monocristallin, le phénomène de glissement des lamelles du copeau correspond en réalité à un déplacement entre les particules individuelles qui composent un grain, voire même à l'intérieur d'un grain poly-cristallin. Ce déplacement des grains entraîne inévitablement une élévation significative de la température, suivie d'une altération des propriétés mécaniques de la surface résultant de l'opération de coupe. En conséquence, cette surface devient plus dure et plus fragile par rapport à la zone centrale de la pièce, comme illustré dans les figures 4 et 5.

Figure 4. Déplacement et déformation des grains monocristallins en coupe orthogonale.

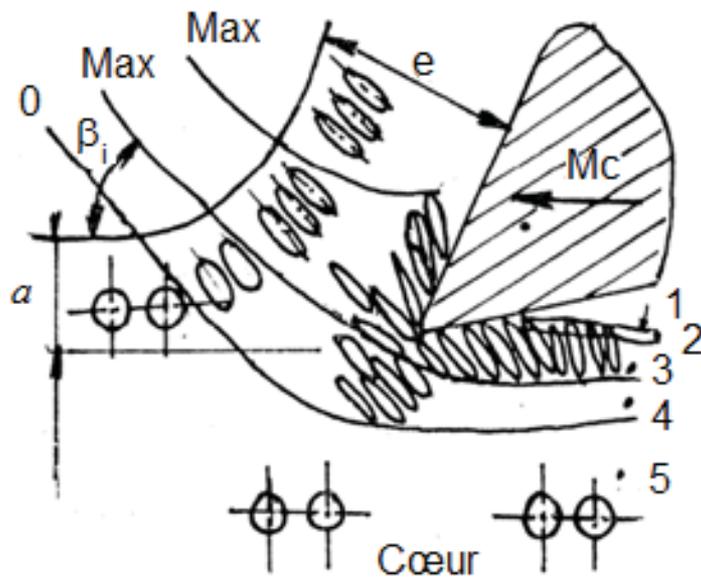
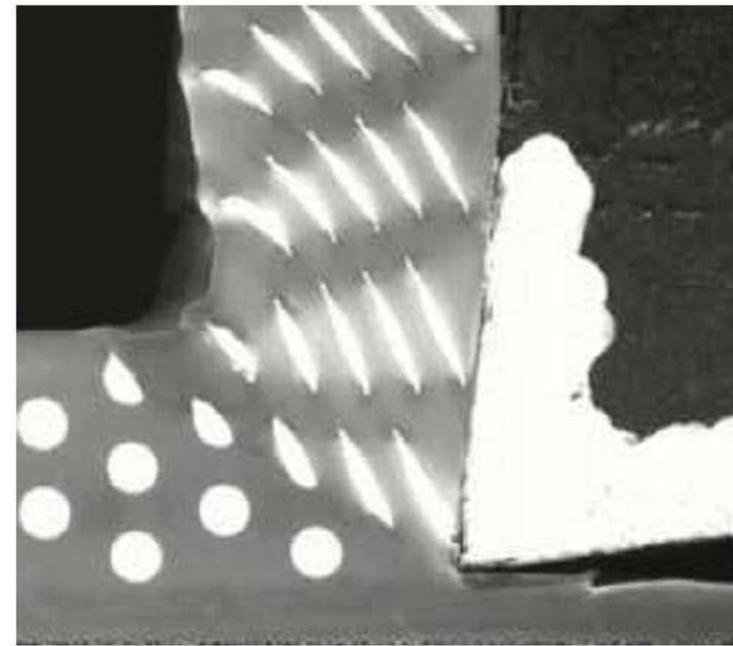


Diagramme de la micro dureté du métal usiné

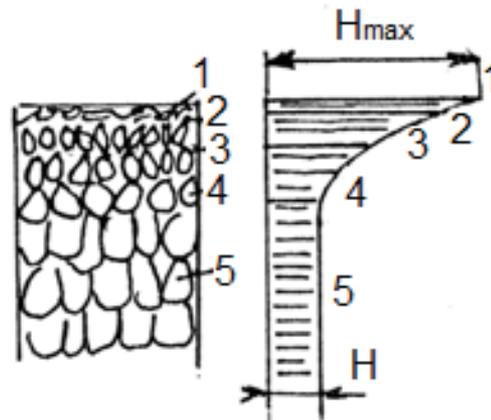


Figure 5. Formation de copeau à l'échelle cristalline.[2]

## ZONES D'ELABORATION DU COPEAU

À l'échelle microscopique, l'étude de la formation du copeau et de l'interaction entre la pièce et l'outil de coupe se déroule à un niveau plus élevé que l'échelle microscopique. De nombreuses recherches ont révélé que près de la zone de contact entre le copeau et la pièce, des zones de contrainte particulièrement distinctes se manifestent. L'identification de ces zones s'effectue en utilisant les principes de l'interaction mécanique des matériaux (analyse thermomécanique) et l'examen du processus de coupe (analyse tribologique). Dans le contexte de la coupe orthogonale, quatre zones distinctes se distinguent, comme illustré dans la Figure 6 :

1. Zone morte, également connue sous le nom de zone de séparation du métal, ou encore zone de forte pression hydrostatique.
2. Zone de cisaillement primaire.
3. Zone de cisaillement secondaire, caractérisée par un frottement intense.
4. Zone de dépouille principale, également appelée zone de cisaillement tertiaire.

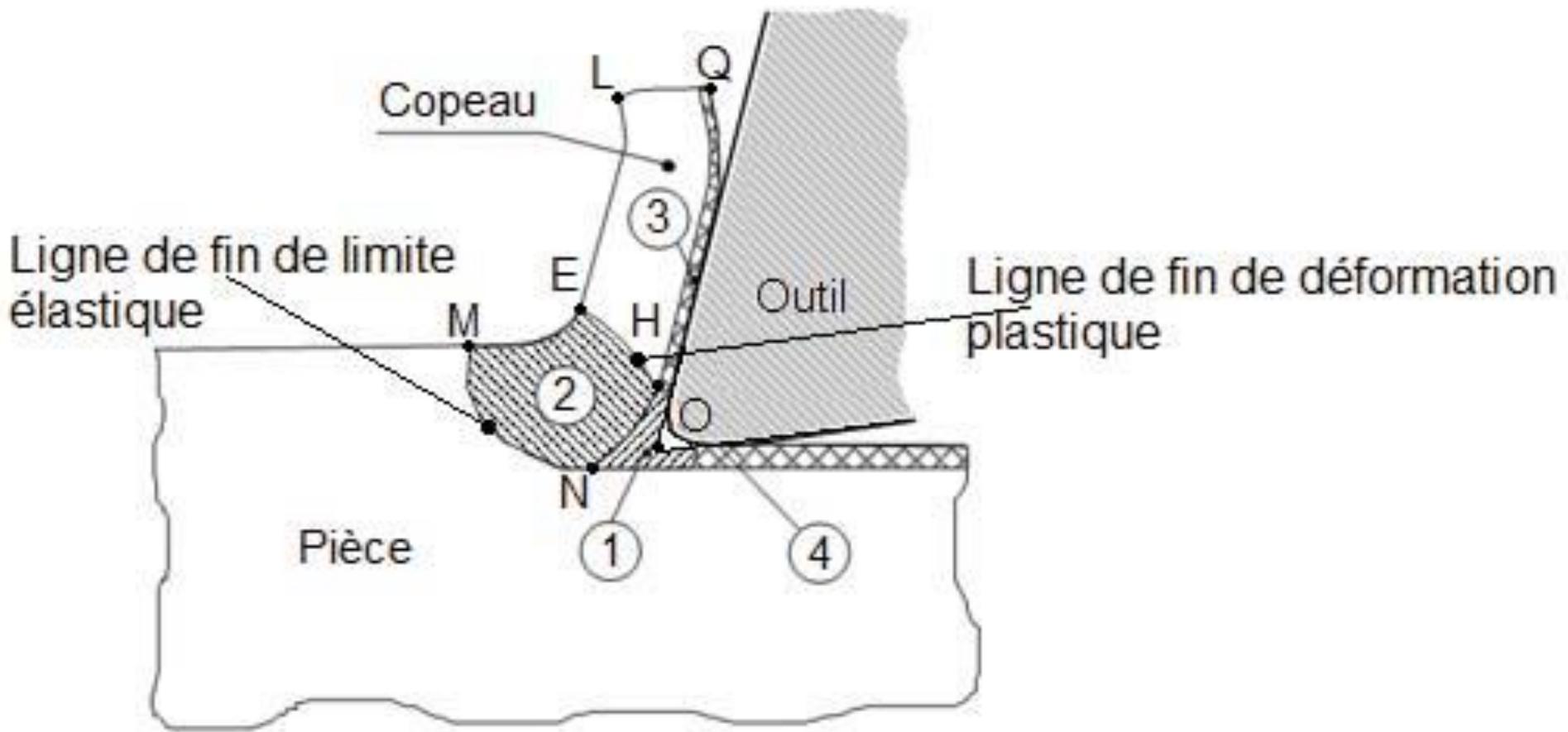


Figure.6. Observation des zones en coupe orthogonale [3,4]

**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 7). [4]

**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. [3]

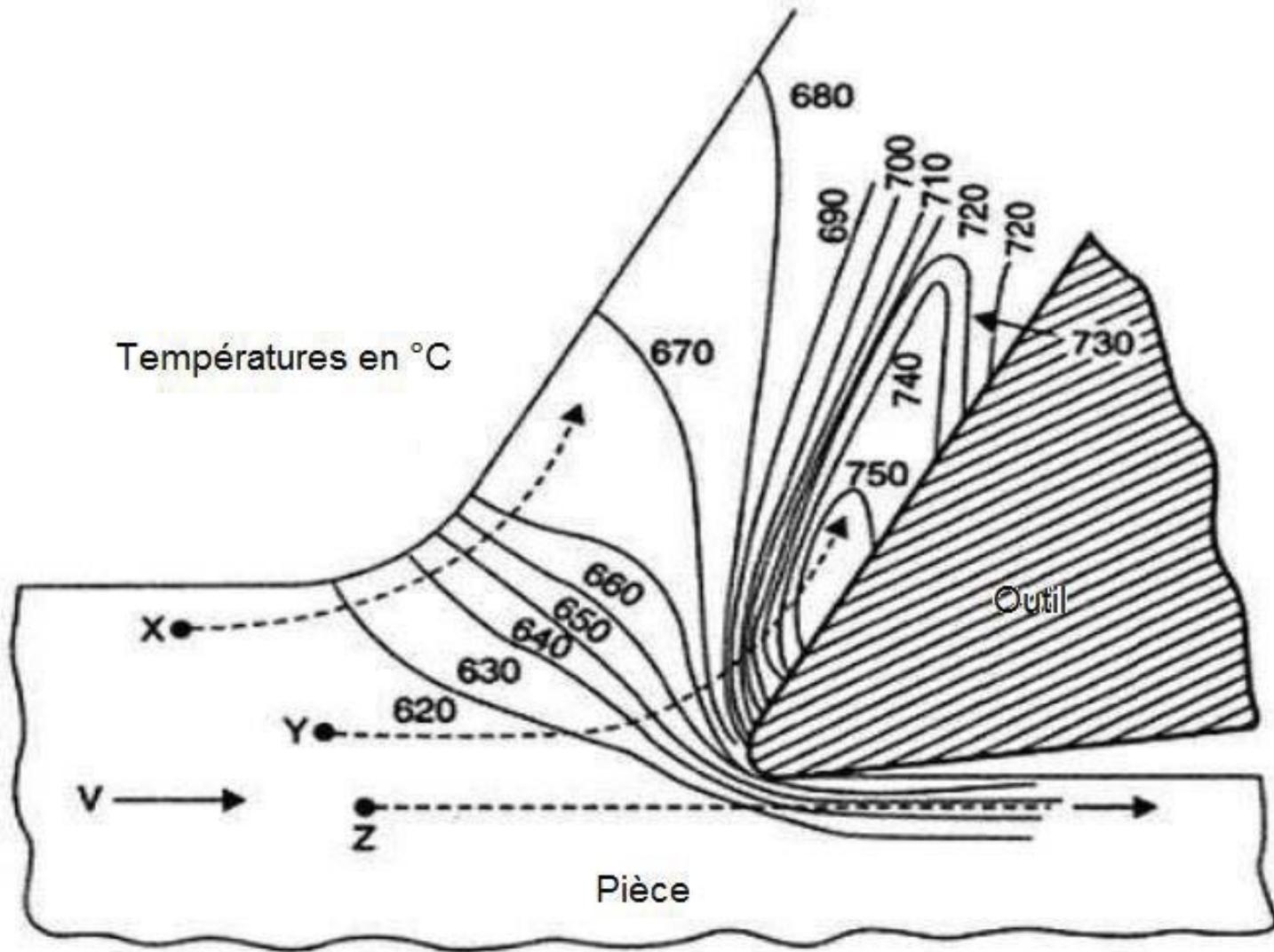


Figure.7. Distribution des températures en coupe orthogonale [6]

**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 7), ajoutant celle de la zone de cisaillement primaire, elle peut atteindre la température de fusion du matériau usiné. [5]

**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. [3]

## FORMES DU COPEAU EN USINAGE

La complexité du processus de formation du copeau nous empêche d'obtenir un contrôle total sur les caractéristiques de la coupe, notamment en ce qui concerne la forme et la structure du copeau résultant. Les copeaux peuvent être généralement classés en deux catégories distinctes : continus et discontinus, comme évoqué dans les références [7,8].

1. Les copeaux continus, qu'ils soient dotés d'une bande ou non, se forment lorsque la déformation plastique se produit de manière continue et stationnaire sous un régime de cisaillement adiabatique. (Voir Figure 8)
2. Les copeaux discontinus, qu'ils présentent une segmentation ou non, se forment lorsque la déformation plastique n'est pas stationnaire. La segmentation des copeaux est déterminée par les phases de fissuration et de rupture du matériau usiné. (Voir Figure 9)

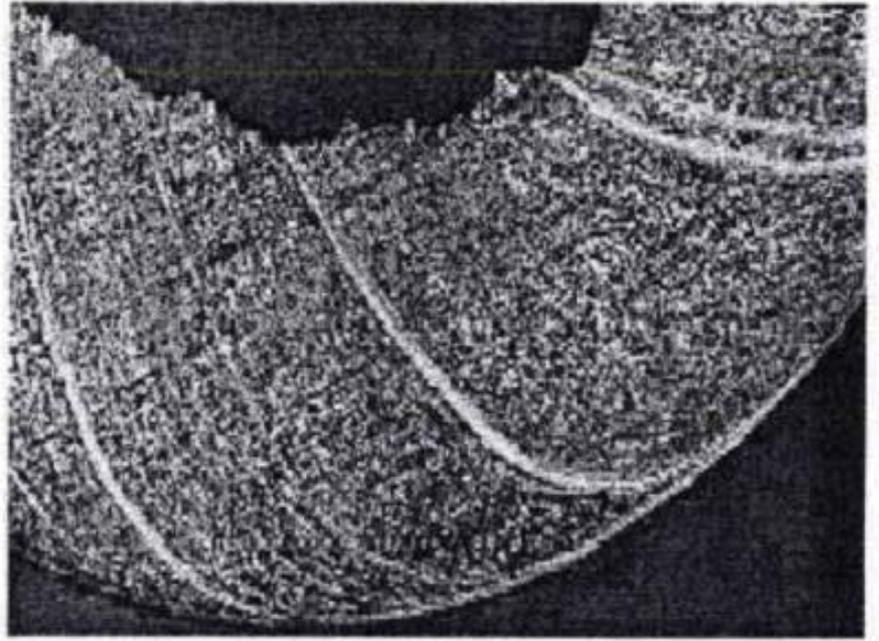
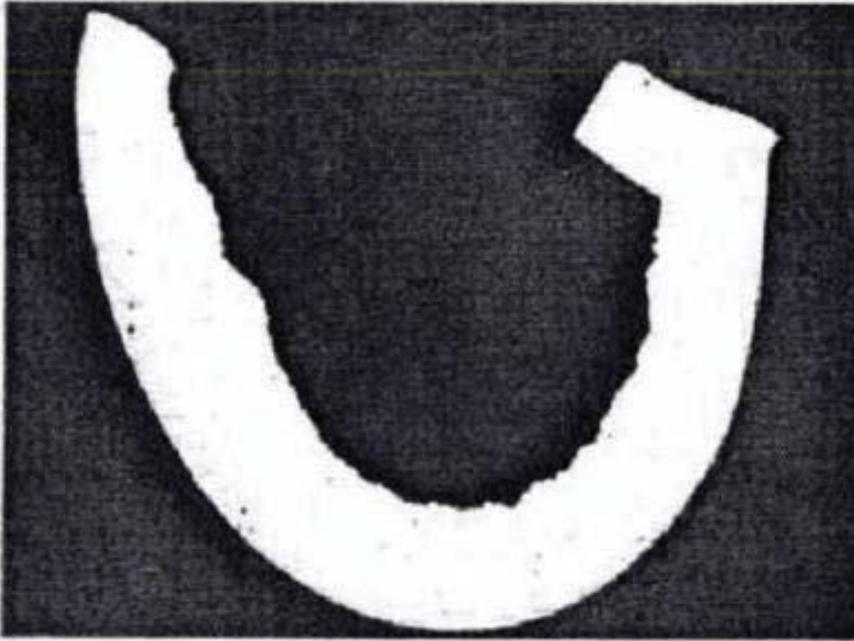


Figure. 8. Copeau continu à surface lisse sans bande de cisaillement et copeau continu à surface lisse avec bande de cisaillement (d'après Heim 96, Sutter 97 et Faure 98). [8]

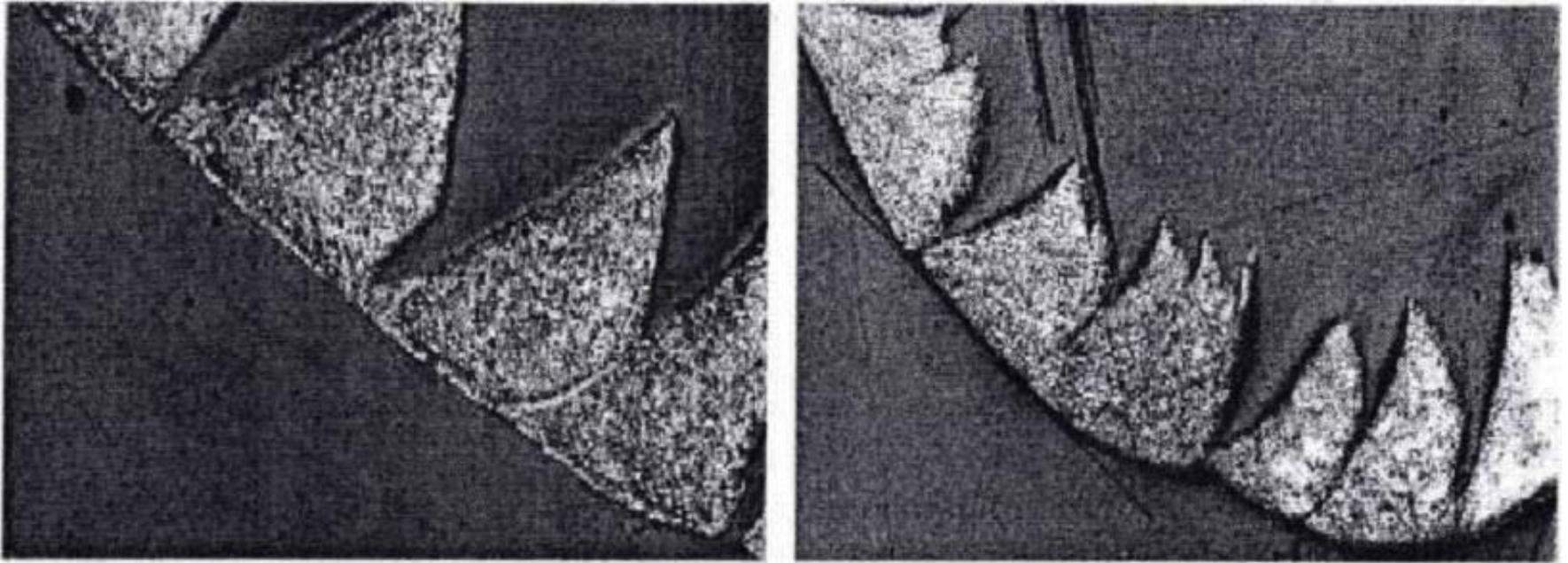


Figure 9. Copeau segmenté régulier et copeau segmenté irrégulier (d'après Heim 96, Sutter 97et Faure 98).[8]

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

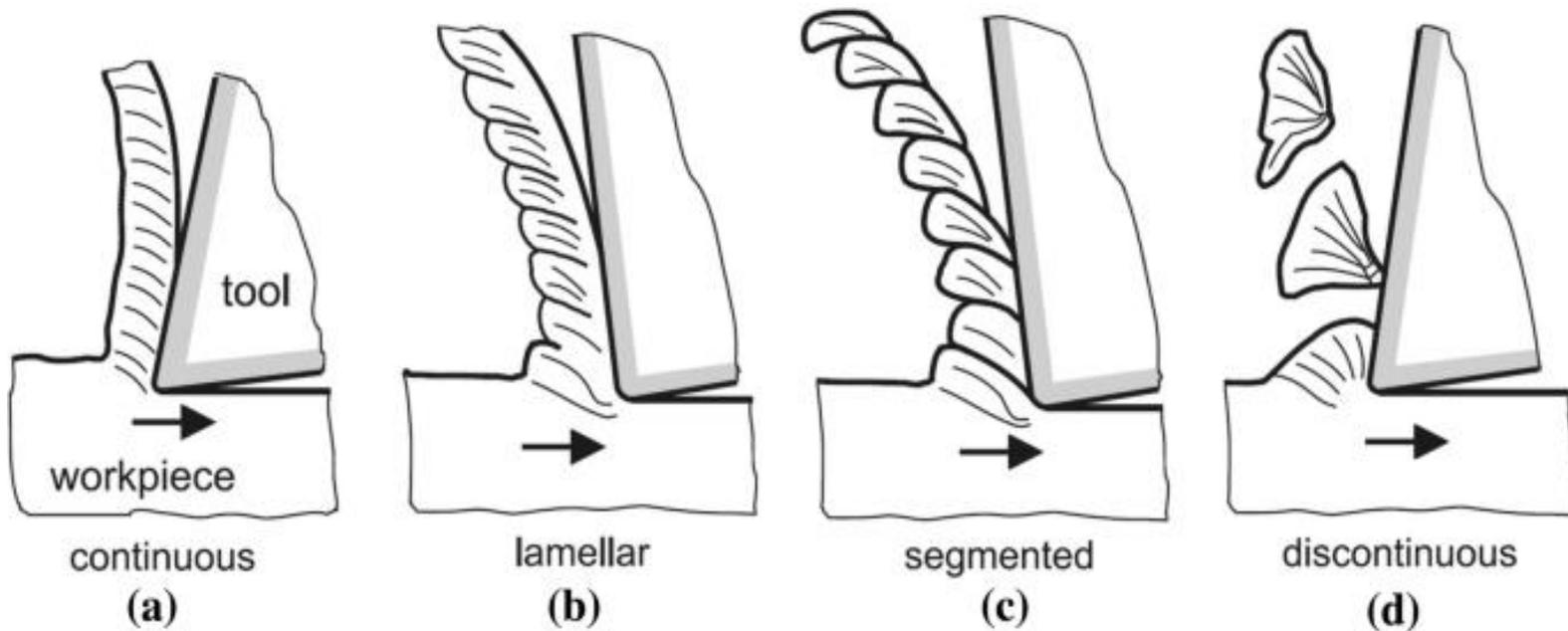
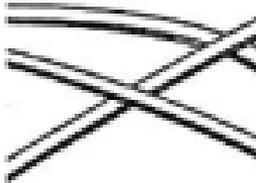
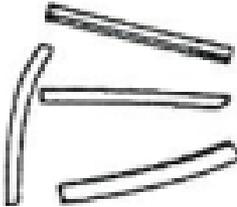
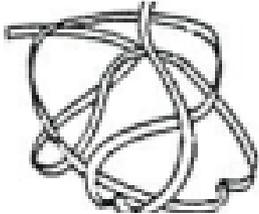
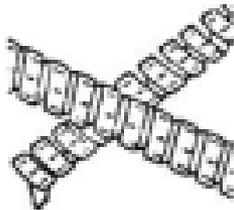
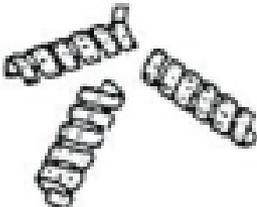
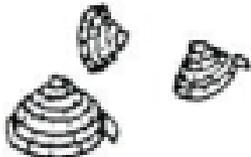


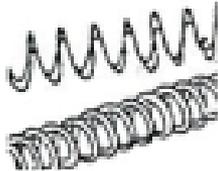
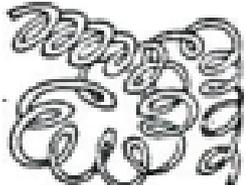
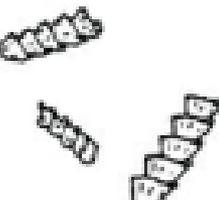
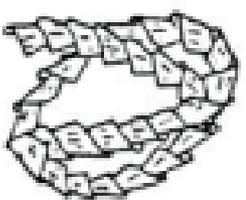
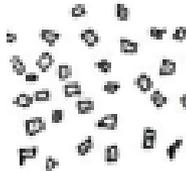
Figure.10. Formes de copeau en coupe orthogonale

## Remarque:

- ❖ 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 1 Classification des copeaux selon la norme NFE 66505[9]**

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			

Pour décrire le mécanisme du tournage externe, les copeaux produits ont été collectés. La forme et la micro géométrie des copeaux sont évaluées et reliées à la géométrie de l'outil et aux conditions de coupe. Les informations sur la forme des copeaux sont importantes pour juger de l'usinabilité. Un copeau cassant court est optimal car il n'affecte pas la surface usinée et peut être facilement évacué de la machine-outil. Les images suivantes donnent un aperçu de l'influence de l'avance et de la vitesse de coupe sur la formation des copeaux, figure 11, 12 et 13. Aucun brise-copeaux n'a été utilisé. Pour le cas de l'acier C45 à des avances et des vitesses de coupe faibles, un copeau emmêlé est obtenu et la formation des copeaux est mauvaise. Des avances élevées conduisent à une rupture des copeaux améliorée [10].

# Pastille de tournage avec brise de copeaux



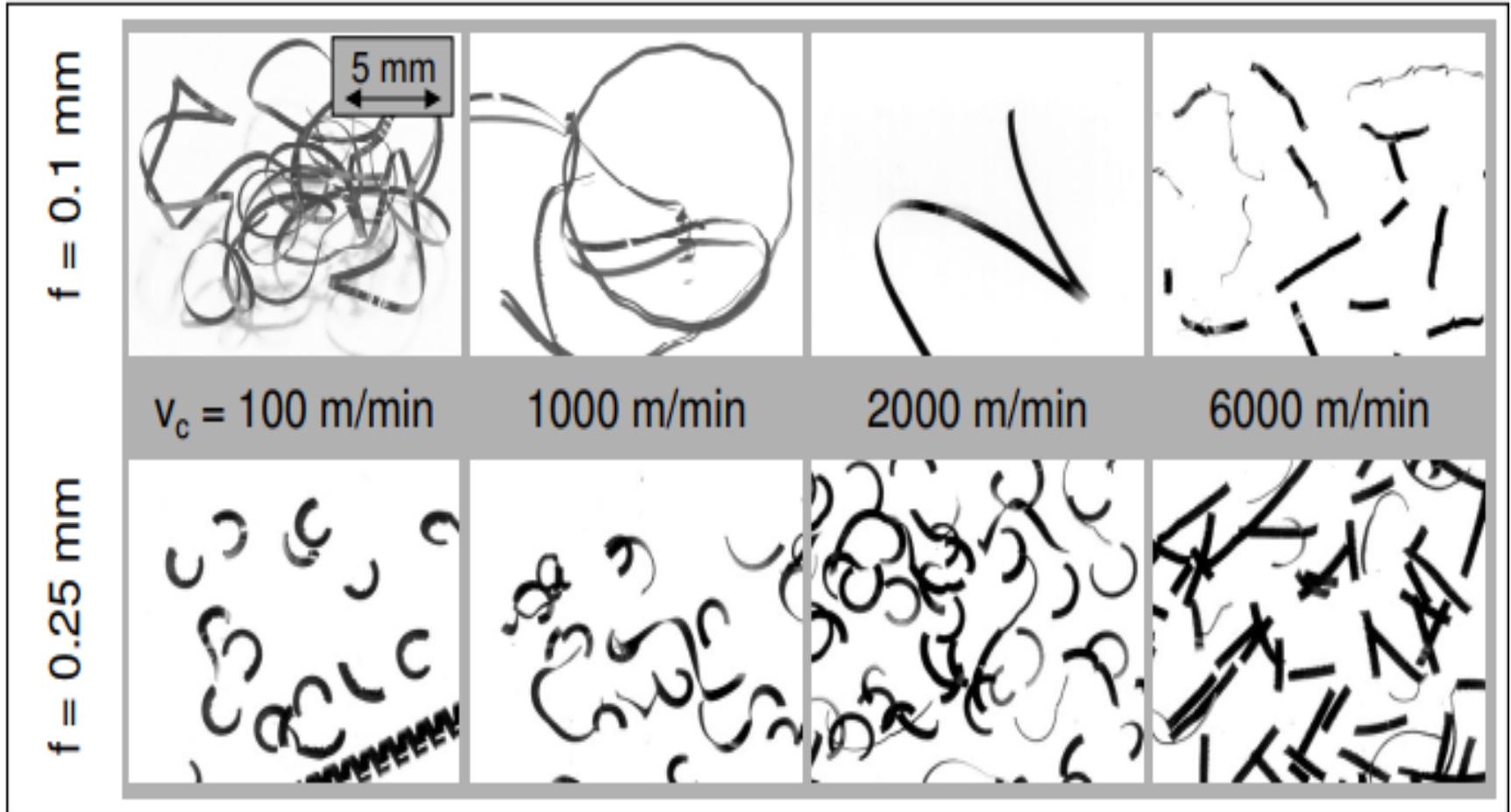


Figure 11 : Forme des copeaux en tournage AISI 1045 (C45) dans des conditions de coupe variables ( $a_p = 1 \text{ mm}$ ) [10].

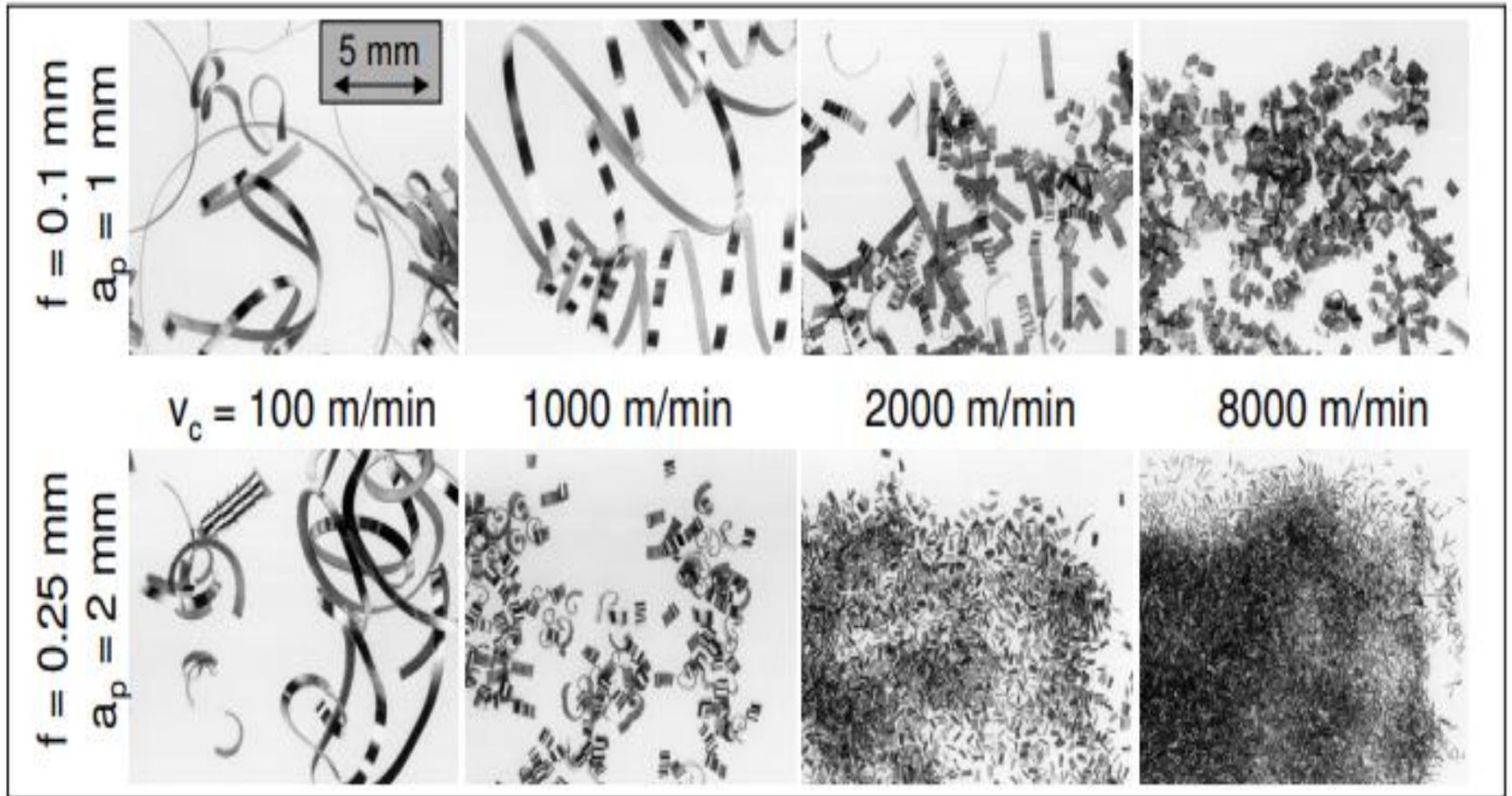


Figure 12 : Forme des copeaux en tournage AA 7075 dans des conditions de coupe variables [10].

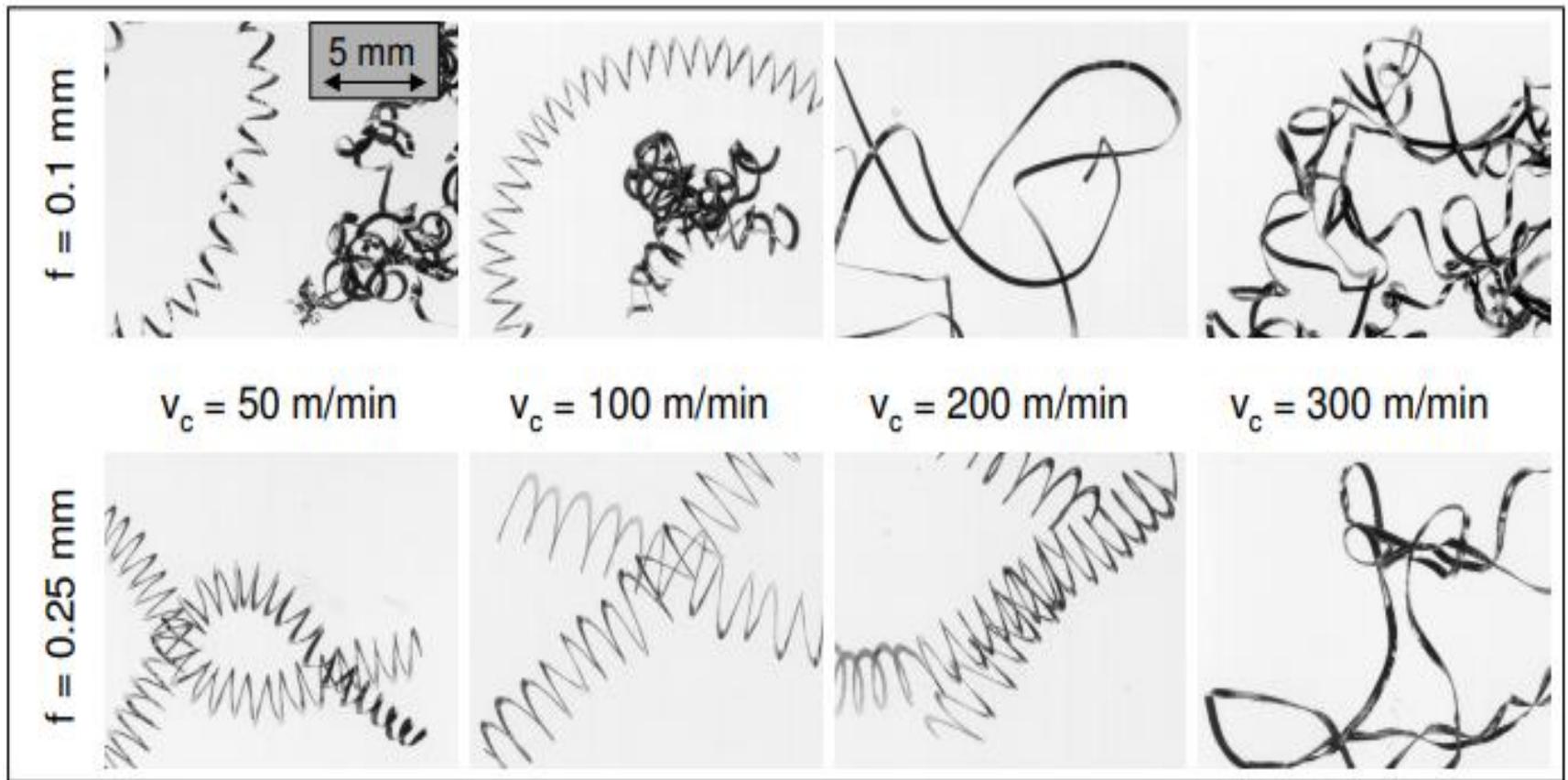


Figure 13 : Forme des copeaux en tournage Ti6Al4V dans des conditions de coupe variables ( $a_p = 1$  mm) [10].

En résumé, l'impact de la vitesse de coupe sur la formation des copeaux varie en fonction de la matière travaillée. Pour l'alliage d'aluminium, une augmentation de la vitesse de coupe favorise une meilleure casse des copeaux. Cependant, en ajustant l'avance et la profondeur de passe, on peut obtenir des valeurs de vitesse de coupe plus basses tout en produisant des copeaux courts.

En ce qui concerne l'acier, une augmentation de la vitesse de coupe n'améliore pas la casse des copeaux. Cependant, un avantage de l'utilisation d'une vitesse de coupe élevée est d'éviter la formation de copeaux hélicoïdaux tubulaires, ce qui facilite leur retrait de la machine-outil.

En revanche, pour l'usinage du titane, augmenter davantage la vitesse de coupe peut transformer les copeaux en un enchevêtrement plutôt qu'en une forme de tire-bouchon. Cette situation est problématique car les copeaux emmêlés ont tendance à adhérer à la pièce en cours d'usinage, ce qui peut endommager la surface de la pièce ainsi que l'outil [9].

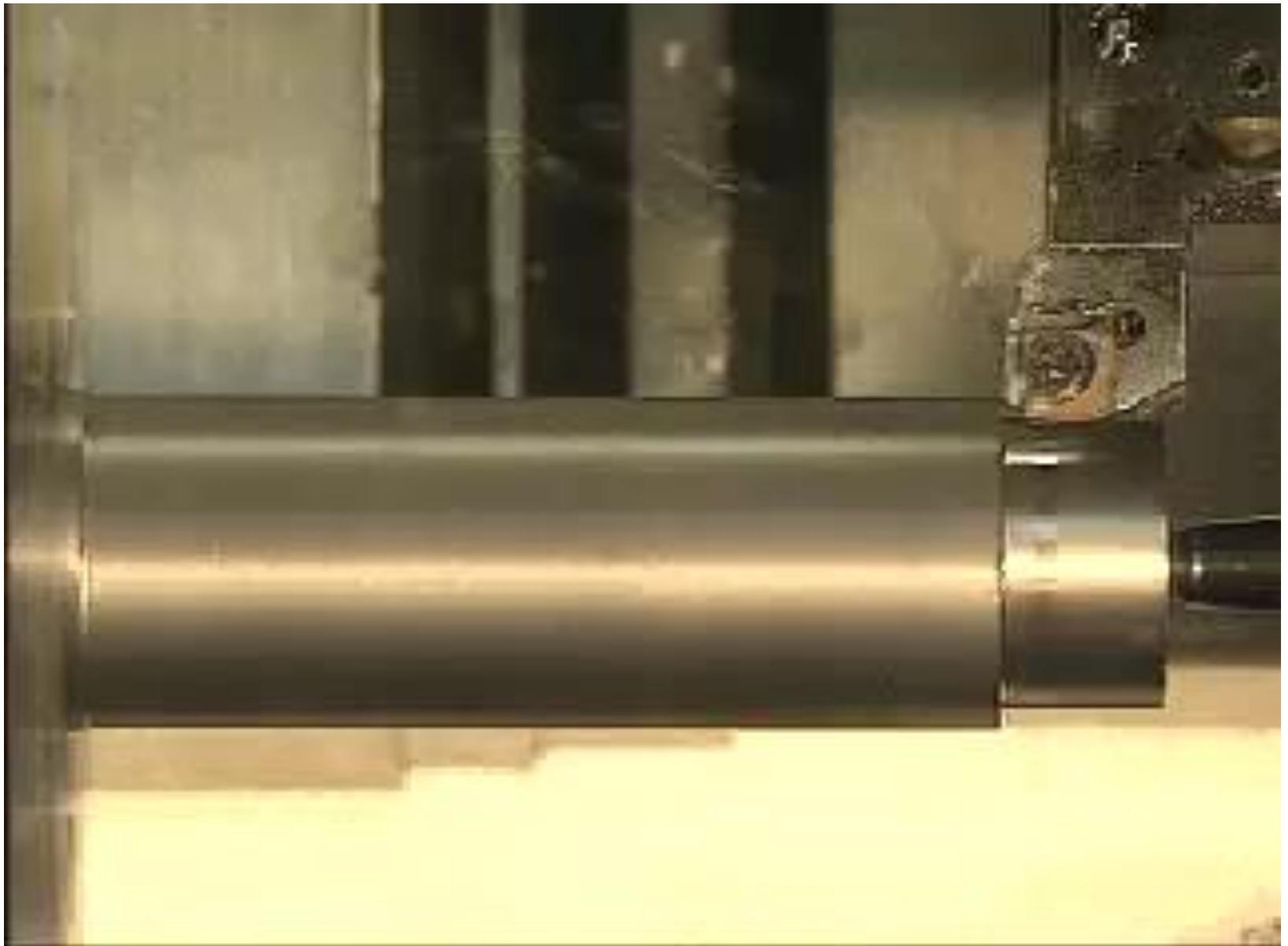
## Références :

- [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, Paris-Tech, 2011. France, 2011.
- [2] S. BENZAADA, Coupe des métaux, Université Mohamed Khider – Biskra –Algérie
- [3] 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.
- [4] 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
- [5] M HABAK : Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage de l'acier a roulement 100Cr6. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2006.
- [6]R. RAJENDRAN, Theory of metal Cutting / Thermal aspects of Machining, Tool materials, Tool wear Cutting fluids and Machinability, Federal institute of science and technology – Kerala – Inde
- [7] : Hoppe, S. (2004). Experimental and numerical analysis of chip formation in metal cutting (Doctoral dissertation, Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2003).
- [8]M. NOUAR I, Modélisation d e l'usure par diffusion des outils de coupe en usinage à grande vitesse, Thèse de Doctorat de l'Université de Metz – France, 2000.
- [9] P. D EPEYRE, Fabrication mécanique, Licence d e Technologie e t Mécanique, Faculté des Sciences et Technologies, Université de la Réunion – France, 2005.
- [10] R. MOHAMMAD, Etude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec. Mise e n place de critère s d'aide à la décision du changement d e plaquette. Application au cas d e l'ébauche d e turbines de pompage, thèse doctorat d e l'Université Toulouse III - Paul Sabatier – Toulouse – France, 2011.

# Formation des copeaux en tournage







# Formation des copeaux en fraisage









