

Etude de la relation entre les conditions de coupe et la morphologie des copeaux en fraisage de l'aluminium 2050

V. Wagner^{a*}, A. Vissio^a, H. Chanal^a, E. Duc^a

^a Clermont Université, IFMA, CNRS UMR 6602, Institut Pascal, BP 10448, F-63000 CLERMONT-FERRAND, France - E-mail : vincent.wagner@ifma.fr.

Résumé : La fabrication des pièces aéronautiques nécessite souvent l'utilisation d'opérations de fraisage afin de limiter les épaisseurs de pièce et répondre aux exigences de poids. Pour cela, la gestion et le recyclage des copeaux surtout pour les matériaux nobles, est la clé de la viabilité économique. Dans l'objectif de recycler les copeaux, nous proposons une étude de la morphologie des copeaux issus de fraisage en fonction des conditions de coupe utilisées dans l'industrie. Nous avons pour cela basé notre analyse suivant deux axes : la morphologie générale des copeaux et leurs caractéristiques dimensionnelles. D'un point de vue morphologique, nous avons observé une forte influence des conditions de coupe et surtout une évolution de la morphologie des copeaux sur la longueur. D'un point de vue dimensionnel, les essais ont également montré une forte corrélation entre les conditions de coupe, les conditions d'engagement et la morphologie de copeau. Ainsi pour obtenir des copeaux fragmentés il est essentiel d'utiliser des conditions de coupe élevées.

Keywords: morphologie de copeaux, aluminium aéronautique, usinage, efforts de coupe

1 Introduction

La réalisation de produits dits "de forme" matricés ou détourés pour l'aéronautique nécessite bien souvent l'utilisation d'opérations d'usinage de manière significative. Ces dernières permettent, en effet, de réduire les épaisseurs afin de répondre aux exigences de poids tout en gardant la résistance du produit. Il en résulte une génération de copeau dont le volume reste très important avec des proportions entre la masse produite et celle des copeaux de près de 50%. La gestion du processus de coupe en vue d'augmenter la productivité et maîtriser la recyclabilité de ces chutes s'avère être la clé de la viabilité

économique et environnementale de ces réalisations. Cette contrainte est d'autant plus forte lors de l'utilisation de matériaux pour lesquels les coûts des éléments d'addition sont prépondérants. C'est le cas des alliages Al-Cu-Li (Aluminium 2050) qui présentent des avantages significatifs pour les applications aéronautiques dans lesquels l'apport de lithium, plus léger que l'aluminium, permet de réduire la densité de l'alliage tout en augmentant son module élastique.

Les travaux existants montrent que dans l'objectif de recycler les copeaux d'aluminium il est souvent nécessaire de réduire ces derniers à l'état de poudre (Samuel 2003). Cependant, cette technique engendre une opération supplémentaire. Afin d'augmenter la productivité, il peut être intéressant de supprimer cette opération de compactage et d'obtenir des copeaux recyclables directement après usinage. Il est, pour cela, nécessaire de maîtriser la morphologie des copeaux.

L'étude de la formation des copeaux a débuté au début du vingtième siècle avec les premiers travaux de (Taylor 1907) et de (Mallock 1881). Depuis, de nombreux travaux se sont succédés afin d'expliquer la formation des copeaux et classifier leurs types (Ernst 1938), (Rech 1964), (Vyas et Shaw 1999), (Rice 1961). On retrouve les copeaux continus dans lesquels les sollicitations sont constantes (Figure 1 (a)); les copeaux segmentés qui sont des copeaux continus où apparaissent des bandes de cisaillement et dont l'épaisseur varie avec le temps (b); les copeaux festonnés formés dans un état de déformation plastique instable (c); et les copeaux discontinus obtenus quand chaque segment se brise (d). La norme ISO/DIS 3685 prévoit de classifier les copeaux en fonction de leurs morphologies. Cependant, peu de travaux concernent l'évolution de la morphologie des copeaux en fraisage. De plus, ils ne prennent pas en compte les caractéristiques dimensionnelles macro géométriques (longueur, volume, épaisseur) des copeaux.

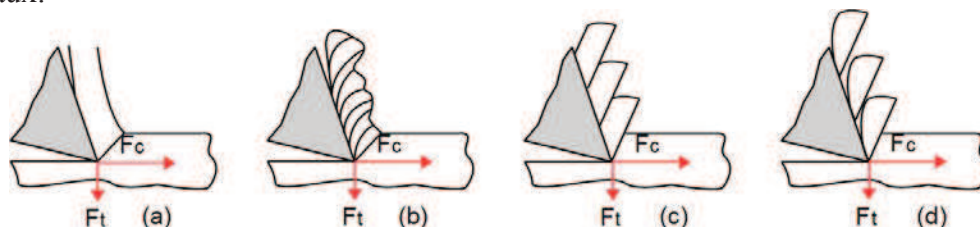


Figure 1: Différents copeaux produits en usinage (a) continu ; (b) segmenté ; (c) festonné ; (d) discontinu

Les diagrammes brise-copeaux sont répandus chez les industriels mais ils ne permettent pas de d'obtenir les caractéristiques dimensionnelles des copeaux et qui n'ont pas encore été réalisés pour l'aluminium 2050. A notre connaissance quelques travaux traitent de la morphologie des copeaux en tournage de l'aluminium. Par exemple, (Rubio, et al. 2006) montre que l'augmentation des conditions de coupe engendre une segmentation des copeaux en tournage d'aluminium. (Deshayes, et al. 2004) et (Daymi, et al. 2009) montrent également que les conditions de coupe influent sur la morphologie des copeaux mais sur un acier AISI 4340. (Kim, Bono et Ni 2002) propose une étude macro géométrique des copeaux obtenus en micro-fraisage. Il propose une analyse dimensionnelle basée sur des images issues d'un microscope électronique à balayage.

L'état de l'art montre donc peu de travaux concernant la morphologie des copeaux issus de fraisage et l'aspect macro géométrique (forme globale du copeau) est généralement peu abordé. L'objectif de ces travaux est d'observer la relation entre les conditions de

coupe et la morphologie des copeaux issus d'opérations de fraisage d'aluminium 2050. Notre analyse se décompose en plusieurs points. Dans un premier temps, nous étudions le copeaux dans sa globalité où nous basons notre étude sur leur aspect général. L'étude dimensionnelle du copeau à savoir son épaisseur, sa longueur, son volume est effectuée dans un second temps.

2 Approche expérimentale

Afin d'établir la relation entre les conditions de coupe et la morphologie des copeaux, nous avons réalisé une série d'essais dont les conditions sont listées dans le tableau 1. Leur choix a été défini selon les plages de fonctionnement utilisées dans l'industrie.

Tableau 1 : Conditions expérimentales

Machine outil	PCI METEOR-10 Puissance : 35 kW Vitesse de rotation max. : 24000 tr/min
Outil	R790-050HA-06S1-16M Sandvik
Plaquette	R790-160420-PH-NM Sandvik
Vitesse de coupe (Vc)	500 m/min; 1000 m/min; 1500 m/min
Avance (fz)	0,1 mm/dt; 0,2 mm/dt; 0,3 mm/dt; 0,4mm/dt
Engagement (ae)	Radial : 25 mm et 50 mm
(ap)	Axial : 5 mm
Lubrification	Emulsion Quakercool 7000 ALF 8% Pression : 8 bars

Les essais ont été réalisés sur des blocs d'aluminium 2050 dont la composition est définie dans le tableau 2. Pour obtenir les efforts de coupe, chaque pièce a été positionnée sur une platine dynamométrique Kistler 9257B.

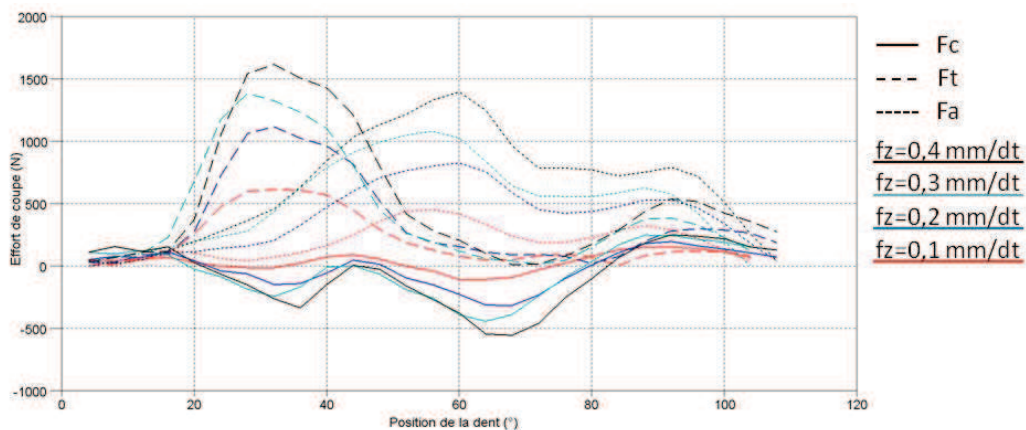
Tableau 2 : Composition Al 2050

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Li	Ag	Zr
Min			3,2	0,2	0,2		0,7	0,2	0,06
Max	0,08	0,10	3,9	0,5	0,6	0,25	1,3	0,7	0,14

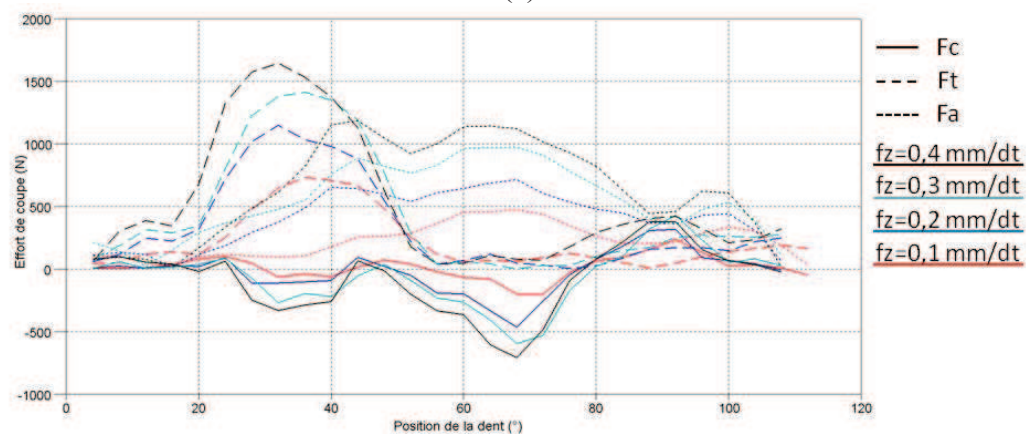
A chaque essai, les copeaux collectés ont été photographiés, grâce à une machine à mesurer multi-capteurs Werth. Pour l'ensemble des conditions de coupe, une analyse dimensionnelle des copeaux est définie suivant plusieurs points : la longueur des copeaux, le volume global, l'épaisseur. La longueur du copeau correspond à la longueur développée (Figure 5). L'épaisseur du copeau a été mesurée à différents points sur l'ensemble de la longueur. Le volume global représente quant à lui le volume du copeau extérieur matière. Il permet d'estimer le volume de matière occupé après usinage et permettra par la suite d'estimer la densité des copeaux.

3 Processus de coupe

La Figure 2 présente l'évolution de chaque composante de l'effort de coupe en fonction de l'avance. Comme nous pouvons l'observer, il existe une relation entre l'effort et l'avance expliquée par le rapport direct entre les efforts de coupe et la section de coupe. Cependant, cette tendance est non linéaire et peut être expliquée par la segmentation des copeaux obtenue avec des avances plus importantes. Une analyse des contraintes dans le copeau montre une faible variation de la contrainte pour l'ensemble des avances testées. A l'inverse, les essais ont montré que l'accroissement de la vitesse de coupe permet d'obtenir une diminution des efforts de coupe. La vitesse de coupe influe sur la vitesse de déformation, la température et par conséquent sur l'adoucissement thermique. Pour une même avance, une vitesse de coupe plus importante permet ainsi de réduire la résistance mécanique du matériau limitant ainsi les efforts de coupe. Enfin, l'utilisation de la lubrification permet également d'obtenir une légère réduction des efforts de coupe. Cette tendance s'explique par une réduction de l'adhérence du matériau sur l'outil généralement observée lors de l'usinage de matériaux ductiles comme l'aluminium. Cet effet se traduit par une réduction de la composante tangentielle de l'effort (F_t).



(a)



(b)

Figure 2 : Composantes de l'effort en fonction de la position de la dent pour $V_c=1000$ m/min et $a_e=25$ mm avec lubrification (a) et sans lubrification (b)

4 Analyse morphologique des copeaux

Comme nous l'observons sur la Figure 3, la morphologie des copeaux est liée aux conditions opératoires et la morphologie des copeaux. La lubrification semble jouer un rôle essentiel dans la morphologie des copeaux. Cependant, le couple avance - vitesse de coupe présente la plus grande influence sur la morphologie des copeaux. Pour une faible avance ($<0,1$ mm/dt), quelque soit la vitesse de coupe les copeaux sont toujours longs et assimilables à un empilement de cylindres de différents diamètres. Pour une avance comprise entre $0,2$ mm/dt et $0,3$ mm/dt, la morphologie dépend également de la vitesse de coupe où son augmentation permet d'obtenir des copeaux segmentés et festonnés et de l'engagement radial qui induit des copeaux plus longs à des conditions de coupe égales.

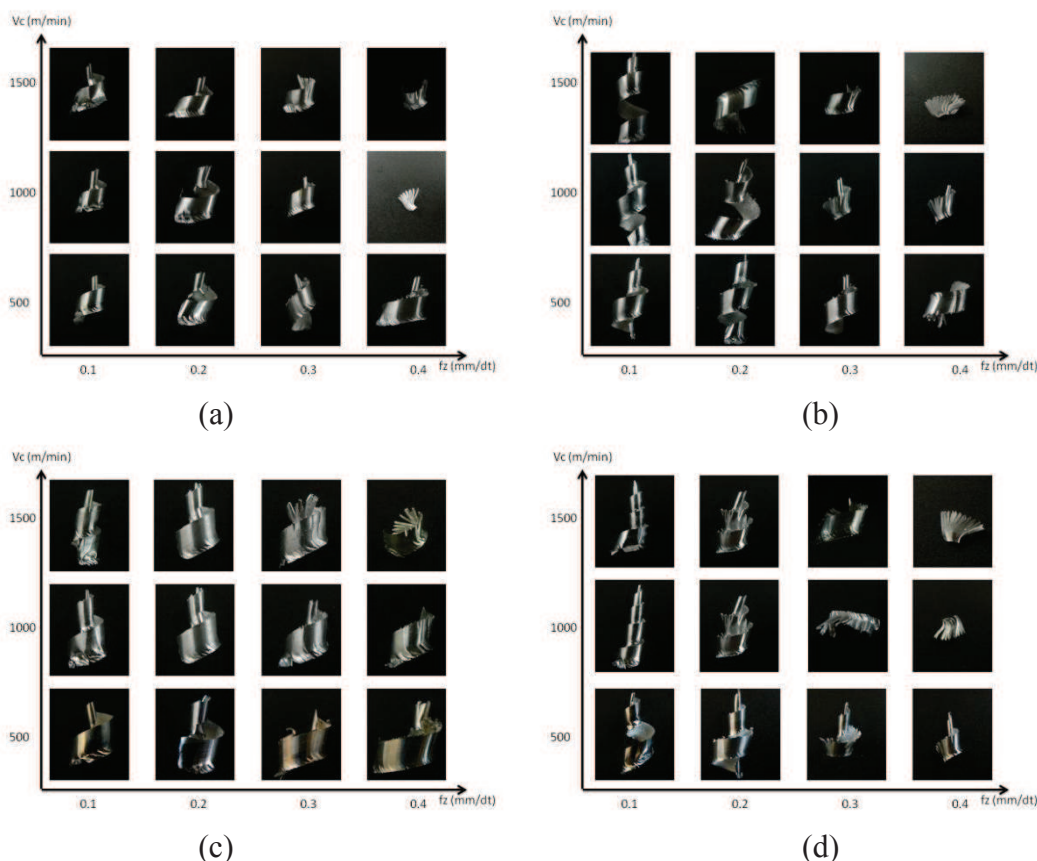


Figure 3 : Evolution morphologique des copeaux en fonction des conditions de coupe pour un engagement radial de 25 mm (a) et de 50 mm (b) avec lubrification et sans lubrification pour un engagement radial de 25 mm (c) et de 50 mm (d)

La Figure 4 présente l'évolution de l'état de surface des copeaux sur l'ensemble de leur longueur. Les travaux existants classifient les copeaux obtenus en tournage en plusieurs catégories (Komanduri, Schroeder, et al. 1982). En fraisage, nous observons qu'un même copeau peut alors être de différents types traduisant une évolution du processus de coupe due à une modification de l'engagement de la dent en fonction de sa position angulaire. Pour une avance de $0,1$ mm/dt, les copeaux sont de type continu sur l'ensemble de leurs longueur. Ce type de copeau traduit une coupe stable où les contraintes dans la bande de cisaillement primaire ne dépassent jamais la limite à la rupture du matériau mais où surtout l'ensemble des sollicitations varient peu.

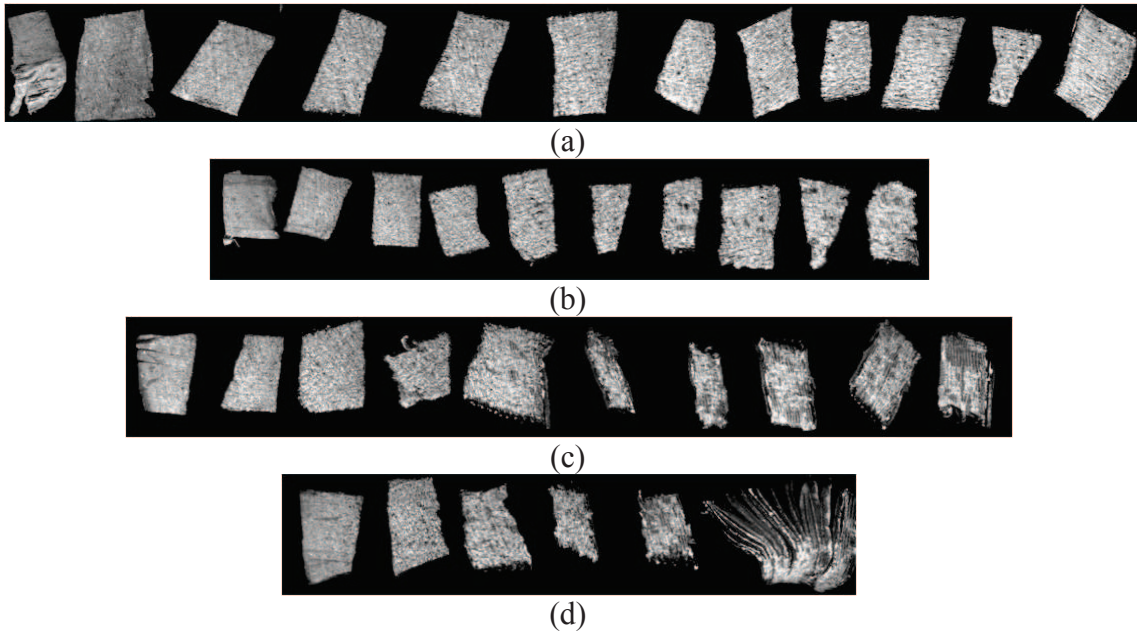


Figure 4 : Evolution de l'état de surface sur la longueur des copeaux à $V_c=1000$ m/min , $a_e=25$ mm pour (a) $f_z=0,1$ mm/dt, (b) $f_z=0,2$ mm/dt, (c) $f_z=0,3$ mm/dt et (d) $f_z=0,4$ mm/dt

Pour une avance supérieure, le type de copeau évolue pour passer d'un copeau continu à un copeau festonné. Cette évolution dépend de la lubrification mais surtout de la vitesse de coupe son augmentation produit des copeaux festonnés et segmentés.

Le passage d'un type de copeau à un autre peut être expliqué en partie par les phénomènes de plasticité adiabatiques (équation 1).

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = \frac{\partial\tau}{\partial\gamma} + \frac{\partial\tau}{\partial\dot{\gamma}} \dot{\gamma} + \frac{\partial\tau}{\partial T} \frac{\tau}{\rho C_p} < 0 \quad (1)$$

τ : Contrainte de cisaillement dans la zone de cisaillement primaire

$\frac{\partial\tau}{\partial\gamma}$: Ecroûissage du matériau

$\frac{\partial\tau}{\partial\dot{\gamma}}$: Sensibilité à la vitesse de déformation

$\frac{\partial\tau}{\partial T}$: Adoucissement thermique

ρC_p : Masse volumique et Chaleur spécifique

En effet, les travaux ont montré qu'il y a segmentation lorsque l'adoucissement thermique l'emporte sur l'écroûissage et la sensibilité à la vitesse de déformation. Dans le cas contraire, il y a donc une coupe stable et par conséquent des copeaux continus. La vitesse de coupe joue un rôle fondamental sur la stabilité de la coupe. La quantité de chaleur dégagée et la température dans les zones de coupe augmente avec la vitesse de coupe. La segmentation des copeaux est par conséquent principalement observée pour des grandes vitesses de coupe. Dans le cadre du fraisage, le type de copeau est modifié par l'engagement variable de la dent modifiant les déformations, les vitesses de déformation et les quantités de chaleur produites.

5 Analyses dimensionnelles

Après avoir analysé la morphologie des copeaux, nous avons comparé leurs caractéristiques dimensionnelles. En effet, il est assez simple d'estimer le volume de matière enlevé pour chaque dent mais il est plus difficile d'évaluer son encombrement après usinage.

5.1. Volume englobant

Afin de déterminer le volume global des copeaux, chaque enroulement a été assimilé à un cylindre de rayon D_i et de hauteur H_i , le volume global étant la somme des volumes de chaque cylindre (équation 2).

$$V = \sum_1^n \frac{\pi D_i^2}{4} H_i \quad (2)$$

D_i : Diamètre du cylindre i (mm)

H_i : Hauteur du cylindre i (mm)

n : nombre de cylindre

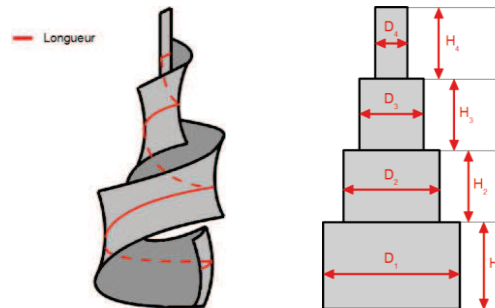


Figure 5 : Représentation de la longueur de copeau et de son volume

La Figure 6 représente le volume d'un copeau après usinage pour l'ensemble des conditions testées. Les valeurs reportées représentent la moyenne de cinq copeaux récoltés. Comme, nous l'avons observé précédemment l'augmentation de l'engagement radial engendre un accroissement du volume des copeaux (Figure 6).

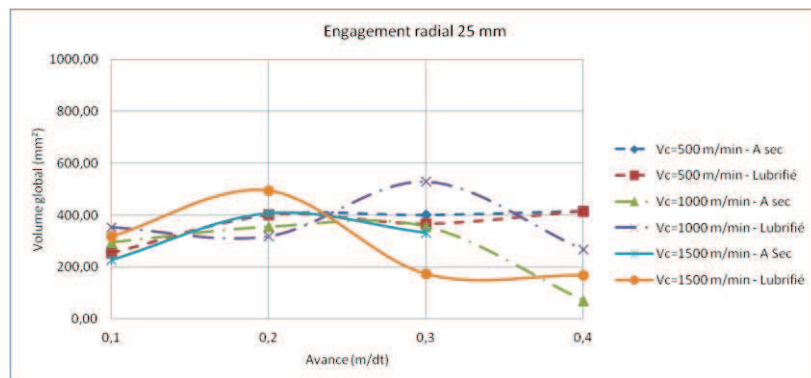


Figure 6 : Volume global des copeaux pour un engagement radial de 25mm

Cette tendance est expliquée par une longueur de copeau plus importante. Une avance plus importante permet de réduire le volume des copeaux quelque soit les vitesses de coupe. Comme nous l'avons observé lors de l'analyse morphologique, une avance plus importante engendre des copeaux festonnés et segmentés limitant ainsi leur volume. Il est à noter que le volume de copeau est souvent supérieur au volume de matière enlevé par chaque dent.

5.2. Longueur du copeau

Dans cette partie, nous nous intéressons à définir l'influence des conditions opératoires sur la longueur du copeau. Dans un premier temps, nous observons pour toutes les conditions de coupe, la longueur mesurée est toujours inférieure à la longueur du copeau théorique (78 mm pour $a_e=50$ mm). Pour une avance supérieure à 0,2 mm/dt, il apparaît que les copeaux obtenus avec une vitesse de coupe égale à 500 m/min sont les plus longs (Figure 7). Cette observation traduit une différence notable dans le processus de coupe et surtout dans la génération des copeaux. Comme nous l'avons observé dans la partie Analyse morphologique des copeaux, pour une vitesse de coupe faible le copeau est de type continu et traduit un processus de coupe stable limitant la segmentation des copeaux. Cette même observation peut également être réalisée sur les copeaux obtenus avec une avance de 0,1 mm/dt où nous observons des copeaux de mêmes longueurs quelle que soit la vitesse de coupe. Les volumes de copeaux minimum sont obtenus pour des avances importantes.

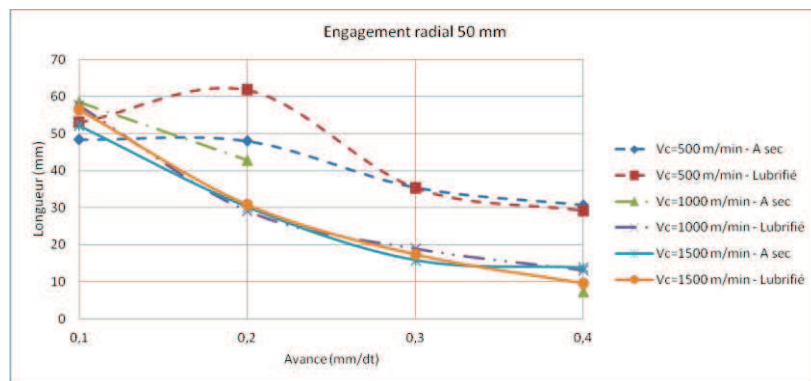


Figure 7 : Influence des conditions de coupe sur la longueur du copeau pour un engagement de 50 mm sans lubrification

5.3. Epaisseur du copeau

L'épaisseur du copeau est le dernier point non négligeable dans l'objectif de la compréhension du processus de coupe. En fraisage, l'engagement de la plaquette est fonction de sa position angulaire et peut être défini en se basant sur le travaux de (Martelloti 1941). Cependant, il est plus difficile d'estimer l'épaisseur du copeau qui

reste fonction de l'avance donnée mais également du processus de coupe. Comme le montre la Figure 8 deux tendances apparaissent : les copeaux obtenus pour une avance inférieure ou supérieure à 0,2 mm/dt. En effet pour une avance faible, l'épaisseur du copeau reste proche de l'épaisseur de coupe traduisant le type de copeau continu obtenu. A l'inverse, dès que l'avance augmente le rapport entre l'épaisseur de copeau et l'épaisseur de coupe instantanée augmente. Cette même tendance a été observée lors des essais effectués avec lubrification.

Les essais ont permis d'observer que l'augmentation de l'avance et de la vitesse de coupe induit une épaisseur de copeau supérieure. Cet accroissement est dû à l'apparition du festonnage sur les copeaux.

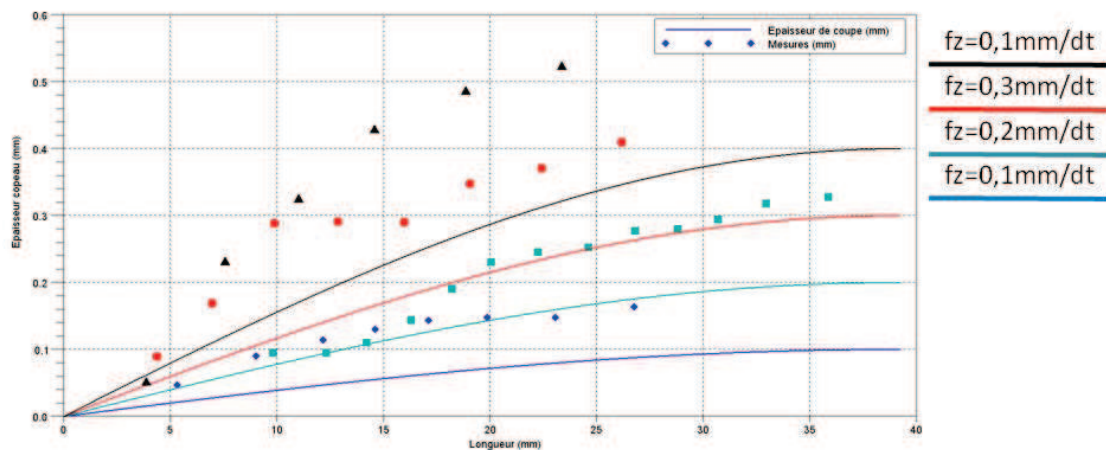


Figure 8 : Evolution de l'épaisseur des copeaux en fonction de l'épaisseur instantanée pour $V_c=1000$ m/min; $a_e=25$ mm et à sec

6 Conclusion

Ces travaux présentent une analyse de l'évolution de la morphologie du copeau en fonction des conditions de coupe, des conditions d'engagement et de la lubrification. D'un point de vue processus de coupe, les essais ont permis de montrer que l'augmentation de l'avance permet d'accroître les efforts de coupe à l'inverse de la vitesse de coupe qui engendre une réduction des efforts. L'utilisation de la lubrification permet également de limiter les efforts de coupe par la limitation des frottements à l'interface outil-copeau.

D'un point de vue morphologique, il est à noter que pour réduire le volume des copeaux il est nécessaire d'augmenter les conditions de coupe. Cependant, cette augmentation engendre une évolution du type de copeau. Pour une avance et une vitesse de coupe faibles, les copeaux sont continus alors que pour des conditions plus élevées ces copeaux deviennent festonnés et segmentés. Il est alors possible d'augmenter la densité des copeaux (rapport entre leur volume et leur masse) mais au détriment de l'état de surface des copeaux, pouvant également jouer un rôle sur la recyclabilité mais aussi sur la santé matière des copeaux. Il est alors essentiel de prendre en compte ces différents dans l'objectif de pouvoir recycler des copeaux directement après usinage et obtenir des pièces avec les mêmes propriétés physiques et chimiques.

7 Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet OFELIA regroupant divers industriels (Constellium, Aubert & Duval, REX-Composites et LUSINA) ainsi que des laboratoires de recherche (l'Institut de Mécanique Avancée, Armines-CEMEF, le laboratoire des Mines-Paris-Tech et Armines-SPI). Ce projet vise à optimiser la fabrication et la chaîne de recyclage des copeaux venant de la fabrication de pièces issues de la technologie Airwaire (aluminium 2050). Ce travail est conduit sous l'égide du groupe de travail Manufacturing'21 qui regroupe les instituts de recherche, de développement, de transfert de technologie et de formation dans la fabrication par usinage Français.

8 Références

- Daymi, A., M. Boujelbene, S. Ben Salem, B. Hadj Sassi, et S. Torbaty. «Effect of the cutting speed on the chip morphology and the cutting forces.» *Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering* 121 (2009): 77-83.
- Deshayes, L., T. Mabrouki, R. Ivester, et J-F Rigal. «Serrated chip morphology and comparison with finite element simulations.» *ASME*, November 2004: pp 1-9.
- Ernst, H. «Physics of metal cutting, In Machining of Metals.» *American society for Metals*, 1938: pp 1-34.
- Kim, C., M. Bono, et J. Ni. «Experimental analysis of chip formation in micro-milling.» *Society of Manufacturing Engineers*, 2002.
- Komanduri, R. «Machining and grinding: a historical review of the classical paper.» *Applied Mechanics Review* 46 (1993): pp 80-132.
- Komanduri, R., T. Schroeder, J. Hazra, B.F. von Turkovich, et D.G. Flom. «On the catastrophic shear instability in high-speed machining of an AISI 4340 Steel.» *Journal of Engineering for Industry* 104 (1982): pp 104-121.
- Mallock, A. «The acting of cutting metals.» *Soc. Lond.* 33 (1881): pp 127-139.
- Martelloti, M.E. «An analysis of the milling process.» *ASME* 74 (1941): pp 671.
- Rech, R.F. «Catastrophic thermoplastic shear.» *ASME* 31 (1964): pp 189-193.
- Rice, W.C. «The formation of continuous chips in metal cutting.» *Proc.Inst. Mech. Engrs.* 114 (1961): pp 141-174.
- Rubio, E.M., A.M. Camacho, J.M. Sanchez-Sola, et M. Marcos. «Chip arrangement in the dry cutting of aluminium alloys.» *Journal of Achievement in Materials and Manufacturing Engineering* 16 (2006): 164-170.
- Samuel, M. «A new technique for recycling aluminium scrap.» *Journal of Materials Processing Technology* 135 (2003): pp117-124.
- Taylor, F.W. «On the art of cutting metals.» *ASME* 28 (1907): pp 307-326.
- Vyas, A., et M.C. Shaw. «Mechanics of saw-tooth chip formation in metal cutting.» *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1999: pp 121-163.
- Xie, J.Q., A.E. Bayoumi, et H.M. Zbib. «Analytical and experimental study of shear localization in chip formation in orthogonal machining.» *AMS International* 4 (1995): 32-38.