



HAL
open science

Analyse expérimentale de l'écoulement des copeaux en usinage du Ti5553

Mohand Ouidir Sahbi, Vincent Wagner, Gilles Dessein, Abdelhamid Sadeddine, Abdelatif Belamri

► **To cite this version:**

Mohand Ouidir Sahbi, Vincent Wagner, Gilles Dessein, Abdelhamid Sadeddine, Abdelatif Belamri. Analyse expérimentale de l'écoulement des copeaux en usinage du Ti5553. Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, GRENOBLE, France. hal-04784355

HAL Id: hal-04784355

<https://hal.science/hal-04784355v1>

Submitted on 15 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Influence du rayon de bec et de l'avance de l'outil sur l'angle d'écoulement des copeaux dans l'usinage à sec de l'alliage de titane Ti5553

Mohand Ouidir SAHBI^(a), Vincent WAGNER^(b), Gilles DESSEIN^(b),
Abdelhamid SAD-EDDINE^(a), Abdelatif BELAMRI^(a)

(a) *Laboratoire de Mécanique, Matériaux et Energétique (L2ME), Faculté de Technologie, Université de Bejaia, 06000 Bejaia, Algérie*

(b) *Laboratoire de Génie de Production, ENI Tarbes, 65016 Tarbes, France*

Mail : mohandouidir.sahbi@univ-bejaia.dz

Résumé : L'usinage des alliages de titane diffère de celui des autres métaux, la consommation d'énergie et les forces d'usinage lors du tournage sont nettement inférieures à celles lors du tournage des aciers ou des alliages à base de nickel et de cuivre. Les faibles propriétés thermiques et les propriétés mécaniques élevées de cet alliage rendent son usinage difficile. L'objectif de cet article est de suivre l'angle d'écoulement des copeaux lors de l'opération de tournage de l'alliage de titane Ti5553, en considérant l'effet du rayon de bec et de l'avance. Un programme est développé pour mesurer l'angle d'écoulement des copeaux. Pour vérifier la morphologie des copeaux et le processus de coupe pendant l'usinage, une section décrivant la microstructure des copeaux et les forces de coupe est présentée.

Au cours des expériences, des changements significatifs dans la formation des copeaux et les efforts de coupe ont été observés. L'angle d'écoulement des copeaux varie en fonction des conditions de coupe, en particulier l'avance et le rayon de bec. Un rayon de bec $r=0,4$ mm réduit l'angle considérablement l'angle d'écoulement du copeau et influence sa direction, qui alterne entre des valeurs positives et négatives précisément pour une avance $f=0,1$ mm/tr.

Mots clés : Ti5553, Angle d'écoulement, Copeau, Rayon de bec, Condition de coupe, Usinage.

1 Introduction

La déformation thermique et mécanique couplée lors de la formation des copeaux se manifeste par un simple écoulement de copeaux. L'étude de la direction du flux des copeaux revêt une grande importance tant pour la recherche théorique que pour les processus de fabrication réels. Le contrôle de la taille des copeaux est particulièrement important dans la fabrication mécanique, car il conditionne la productivité, la qualité de la surface usinée, le stockage des copeaux... L'étude de l'angle d'écoulement des copeaux a attiré l'attention de nombreux chercheurs (Fang 1998), (Moufki et al 2000), (Strenkowski et al 2002), (Fang et al 2002) et (Jared et al 2011). En tournage, l'angle d'écoulement des copeaux correspond à la direction de son écoulement définie du plan normal à l'arête de coupe sur la face de coupe de l'outil. Cette interface a toujours été associée à l'analyse de la mécanique d'usinage et à la prédiction des efforts générés (Merchant 1945) et (Oxley et al 1964). En usinage oblique tridimensionnel, il existe deux différences évidentes dans le flux de copeaux comparé à celui de l'usinage orthogonal (Childs 2000). Premièrement, la direction du l'écoulement des copeaux n'est plus perpendiculaire à l'arête de coupe, mais forme un angle avec la direction normale de l'arête de coupe. Deuxièmement, l'épaisseur des copeaux non déformés varie le long des arêtes de coupe non droites. (Stabler 1951) considère que l'angle d'écoulement des copeaux est égal à l'angle d'inclinaison de l'arête de coupe droite et cette affirmation est valable indépendamment des autres paramètres du processus. Bien évident, cette analyse reste juste si l'arête de coupe est rectiligne.

Différents modèles ont été proposés dans le passé pour prédire la direction du l'écoulement des copeaux dans les opérations de tournage, en tenant compte de l'effet de l'arête de coupe et de rayon du bec (Okushima et al 1959) et (Usui et al 1974). À partir de résultats expérimentaux (Young et al 1987) ont mis en point un modèle de prédiction de l'angle d'écoulement des copeaux pour l'usinage avec des outils aux arêtes non rectilignes. Ils expliquent que la direction d'écoulement est fortement conditionnée par les efforts de coupe. (Wang et al 1995) considèrent l'écoulement du copeau dans la coupe avec un outil à rayon de bec comme le résultat des effets distincts de l'arête du rayon de bec et de l'inclinaison de l'arête de coupe. Dans leur travail, l'angle d'écoulement du copeau dû à l'effet du rayon du bec est d'abord déterminé à l'aide d'une méthode similaire à celle proposée par (Young et all 1987). Ils supposent que l'outil a un angle de coupe et un angle d'inclinaison nuls. Une arête de coupe équivalente dans la face de dépouille de l'outil est ensuite considérée. Elle est considérée comme étant un angle droit par rapport à la direction de l'écoulement des copeaux en raison de l'effet du rayon du bec de l'outil. Une fois l'arête de coupe équivalente définie et son angle d'inclinaison déterminé, la règle d'écoulement des copeaux de (Stabler 1951) est utilisée pour déterminer la direction d'écoulement par rapport à l'arête de coupe équivalente. L'angle d'écoulement des copeaux par rapport à l'arête de coupe latérale réelle de l'outil est alors déterminé en superposant les effets distincts du rayon du bec et de l'inclinaison de l'arête de coupe. (Kishawy et 2006) ont présenté un modèle pour la prédiction de l'écoulement des copeaux pendant le processus d'usinage des extrémités de tubes à l'aide d'outils rotatifs autopulsés. Ils ont utilisé une caméra pour enregistrer l'écoulement des copeaux pendant le processus d'usinage. Une bonne concordance a été constatée entre les angles d'écoulement des copeaux prédits et mesurés expérimentalement. Ils ont trouvé que la

vitesse de coupe et l'avance n'ont pas d'effet évident sur la direction absolue du flux de copeaux.

Grâce aux progrès récents des technologies, plusieurs bancs expérimentaux ont été développés (Sutter 2005), (Pottier et al 2014), (Fromentin et al 2016) et (Zouabi et al 2023) avec des caméras à grande vitesse. Il est désormais possible d'accéder à des phénomènes particuliers, d'observer de manière in situ le processus de coupe et obtenir plus de détails sur les relations entre les angles relatifs d'écoulement des copeaux, leur morphologie, les conditions de coupe et les microstructures. Cependant, bien souvent les caméras employées sont positionnées de manière colinéaire à l'arête de coupe.

L'objectif de cet article est de suivre la direction de l'écoulement des copeaux lors d'une opération de tournage de l'alliage de titane Ti5553, en intégrant l'effet du rayon du bec et de l'avance. La première partie présente les essais réalisés, le matériau et la méthode de traitement d'image. Dans la deuxième partie, nous présentons et analysons les résultats obtenus en matière d'écoulement du copeau, d'efforts de coupe et de la microstructure des copeaux et nous terminerons avec une conclusion et des perspectives.

2 Partie expérimentale

Les essais de coupe ont été réalisés à l'aide d'un tour à commande numérique (CNC Genymab 900 SOMAB). Tous les tests ont été effectués sans liquide de refroidissement sur une pièce en alliage de titane Ti5553 dont le diamètre est 150 mm. Des plaquettes en carbure de tungstène CNMG120408TK et CNMG120404TK avec un rayon de bec $r=0.8$ mm et $r=0,4$ mm ont été employées avec un porte-plaquette PCLNL2525M12. Les conditions de coupe sont présentées dans le tableau 1.

Les efforts de coupe sont acquis à l'aide d'une platine dynamométrique Kistler 9129A dans un repère lié à la platine (F_x , F_y et F_z), d'un amplificateur Kistler 5019A et du logiciel d'exploitation DynoWare.

L'observation de l'écoulement du copeau au cours de l'usinage se fait à l'aide d'une caméra rapide Photron Fastcam SA1. Pour les essais, une fréquence d'acquisition de 500 images par seconde est choisie. La résolution maximale est 1024×1024 pixels² et le temps d'acquisition est de plus d'une seconde. Pour ces essais, deux projecteurs à lumière froide ont été utilisés pour l'éclairage sur la zone de coupe. L'ensemble du dispositif expérimental est présenté dans la figure 1.

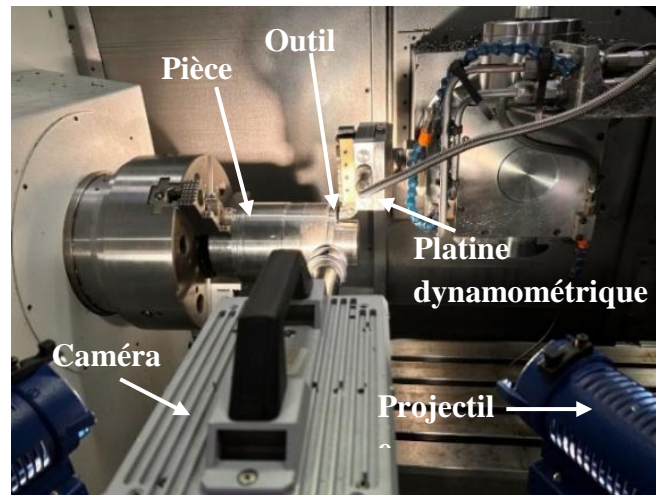


Figure 1 : Dispositif expérimental

Tableau 1 : Conditions de coupe utilisées

Facture	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Vc (m/min)	30	40	
f (mm/tr)	0,1	0,2	0,3
r (mm)	0,8	0,4	

Pour analyser la microstructure des copeaux, ces derniers ont été enrobés dans la résine, polis et subis une préparation métallographique pour analyser la microstructure grâce à un microscope optique. L'analyse s'est focalisée sur la face du copeau en contact avec la face de coupe de l'outil et le rayon de bec comme expliqué sur la figure 2.

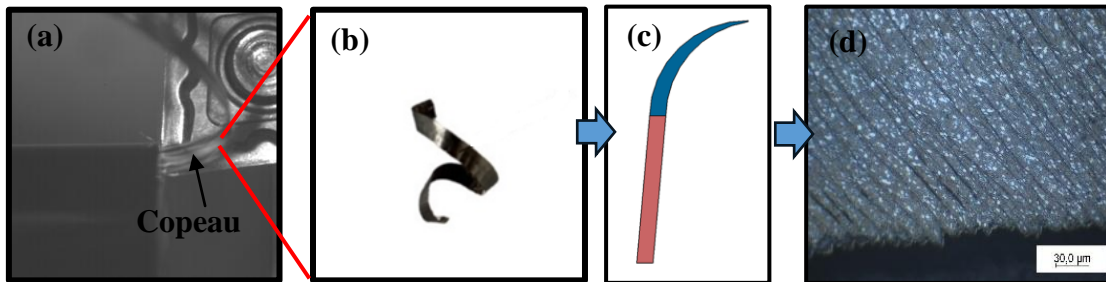


Figure 2 : Section du copeau analysée, (a) image de contact outil-pièce et la formation du copeau, (b) copeau engendré, (c) modèle d'Oxley de la section transversale du copeau (Wagner et al, 2015), (d) microstructure du copeau analysée

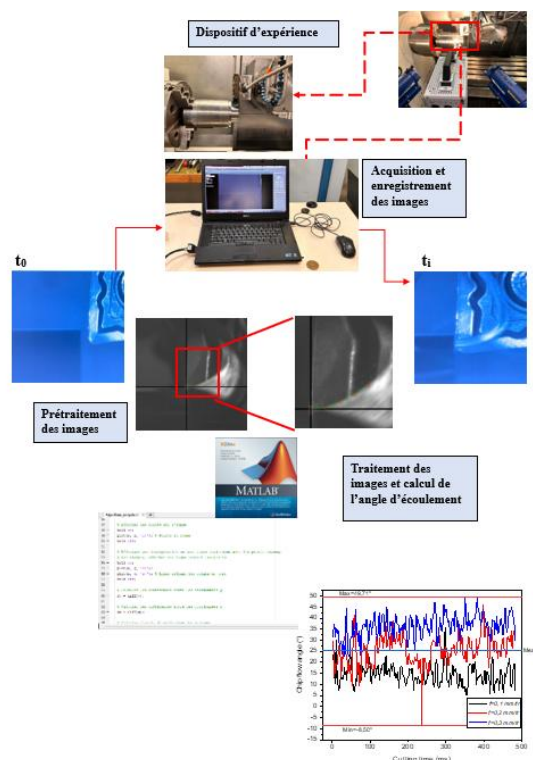


Figure 3 : Étapes d'acquisition et de traitement des images

L'acquisition à haute fréquence d'images numériques de la formation du copeau génère une quantité importante de données. Devant le grand nombre d'images à analyser et la volonté de réduire le temps d'exploitation des données, une séquence de 240 images hypothétiquement représentatives des phénomènes de coupe observés (situés en condition de coupe stable) a été sélectionnée.

Afin de limiter les erreurs de mesure, une méthode de traitement des images et d'automatisation de la mesure des angles d'écoulement a été développée (figure 3). Cette procédure se déroule en deux étapes :

La première étape consiste à effectuer un prétraitement des 240 images choisies en se concentrant sur la zone de contact outil-matière et en choisissant les dimensions appropriées pour l'analyse.

Dans la deuxième étape du processus, un programme est développé sous Matlab. Tout d'abord, le contour du copeau est identifié, et les coordonnées des points représentatifs de sa trajectoire sont déterminées. Ensuite, une interpolation linéaire est appliquée sur ces points en x et y, créant ainsi une ligne droite représentative de la trajectoire du copeau. Enfin, le programme calcule l'angle formé par cette ligne droite par rapport à la ligne horizontale passant par le point de contact du rayon de bec de l'outil avec la pièce. Cet angle correspond à l'angle d'écoulement du copeau.

3 Résultats et discussions

3.1 Angle d'écoulement du copeau

Les angles d'écoulement du copeau ont été mesurés à l'aide d'un algorithme développé sur le logiciel Matlab. Il se base sur des mesures manuelles et une interpolation linéaire, en première approche. En premier lieu, les images ont été redimensionnées afin de simplifier

l'analyse, puis un repère OXY a été tracé. Cette origine correspond à l'arête de coupe de l'outil utilisé. La position exacte de cette origine a été définie directement via le traitement d'image de la séquence considérée, la limite supérieure du copeau a été identifiée. L'analyse se basera d'ailleurs sur cette limite. Pour cela, 5 points sont sélectionnés manuellement. Une régression linéaire est alors effectuée. L'étude de l'écoulement du copeau se fait ensuite au travers de l'analyse de l'angle entre la limite du copeau et l'horizontale ou l'axe de rotation de la pièce au cours de temps, figure 4.

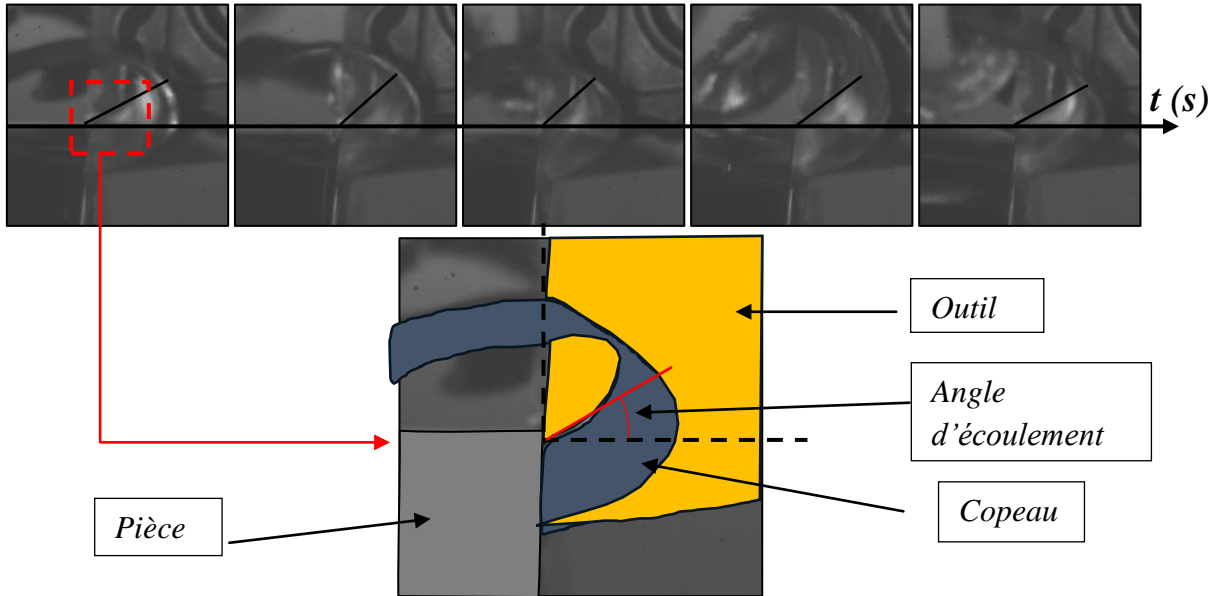


Figure 4 : Évolution de l'angle d'écoulement du copeau en fonction de temps

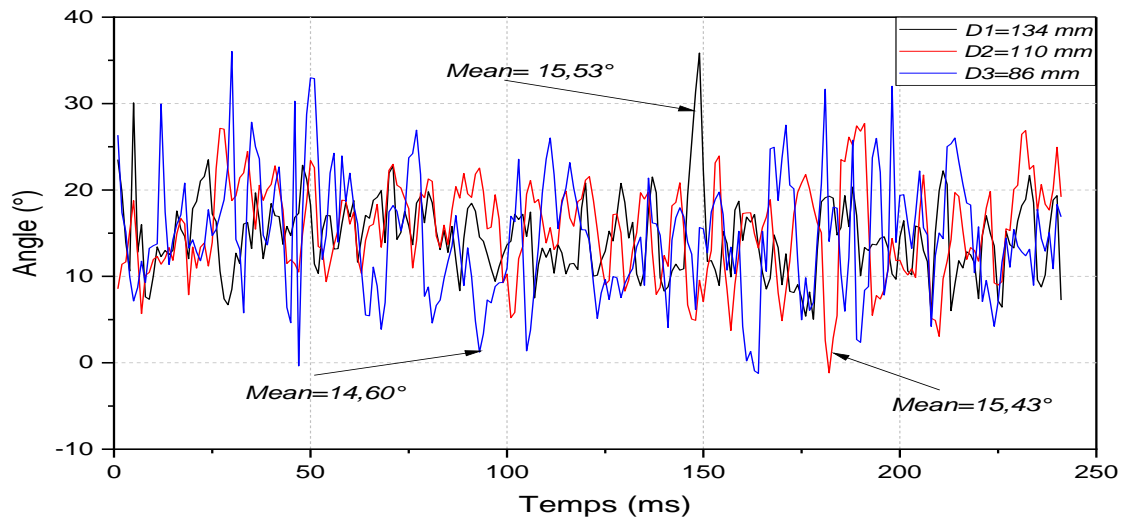


Figure 5 : L'angle d'écoulement du copeau en fonction de diamètre de la pièce, $r=0,8$ mm, $V_c=30$ m/min, $f=0,1$ mm/tr

La figure 5 présente l'évolution temporelle de l'angle d'écoulement du copeau pour trois diamètres différents de la pièce usinée. Les coefficients de variation, respectivement $C_f=0,31$, $0,36$ et $0,47$ correspondent aux diamètres $D1=134$ mm, $D2=110$ mm et $D3=86$ mm. On observe une variation plus marquée pour le diamètre $D3=86$ mm, indiquant une

instabilité de l'angle d'écoulement par rapport au diamètre $D1=134$ mm. Cette instabilité est attribuée aux vibrations de la pièce et à l'augmentation des efforts de coupe près du centre de la pièce.

Les figures 6 et 7 présentent l'évolution de l'angle d'écoulement des copeaux au cours du temps d'usinage en fonction de l'avance f (mm/tr) pour les outils à rayon de bec 0,8 mm et 0,4 mm respectivement, avec $V_c=30$ m/min au voisinage de diamètre $D=134$ mm.

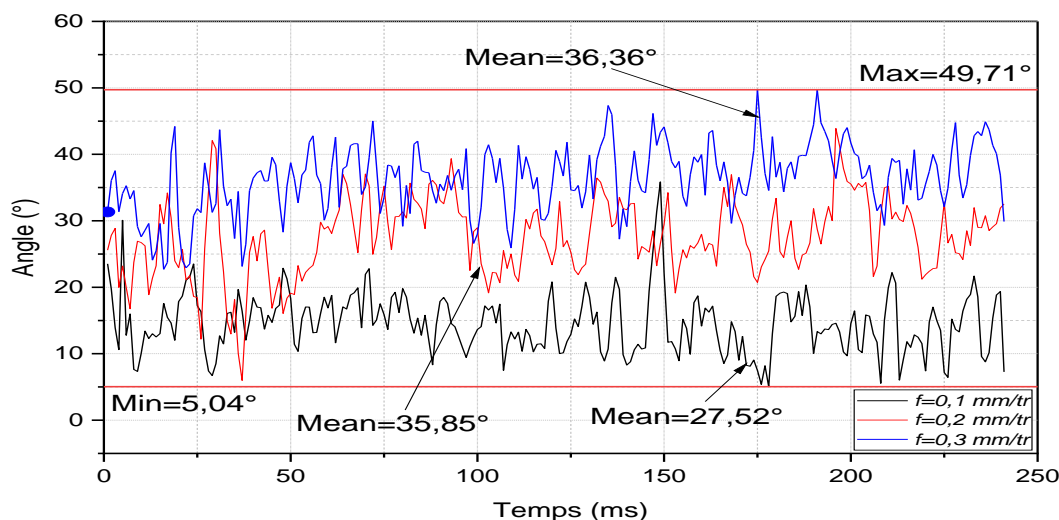


Figure 6 : Évolution de l'angle d'écoulement du copeau en fonction de l'avance f (mm/tr),
 $r=0,8$ mm, $V_c=30$ m/min

Sur la figure 6, on observe que pour une avance $f=0,3$ mm/tr, l'angle moyen est de $36,36^\circ$. Au début de l'enregistrement, l'angle mesuré est de 30° et évolue jusqu'à atteindre un pic à $49,71^\circ$. Pour une avance de $f=0,2$ mm/tr, l'angle moyen est de $35,85^\circ$, tandis qu'il est de $27,52^\circ$ pour une avance de $f=0,1$ mm/tr. Ces variations sont probablement dues aux phénomènes régissant dans l'interface outil-copeau, la variation de l'épaisseur du copeau et l'angle de cisaillement du copeau. Ces paramètres géométriques modifient les paramètres tribologiques à l'interface outil-copeau influençant ainsi la vitesse et l'angle d'écoulement du copeau.

La figure 7 présente la variation de l'angle d'écoulement du copeau en utilisant un outil en carbure de tungstène avec un rayon de bec $r=0,4$ mm et une vitesse de coupe $V_c=30$ m/min, pour trois avances différentes : $f=0,1$, $0,2$ et $0,3$ mm/tr. Il apparaît clairement une forte discontinuité entre les trois avances. Cette évolution peut être due à la section de coupe fortement influencée par le rayon de bec lorsque cette dernière est à son niveau minimum.

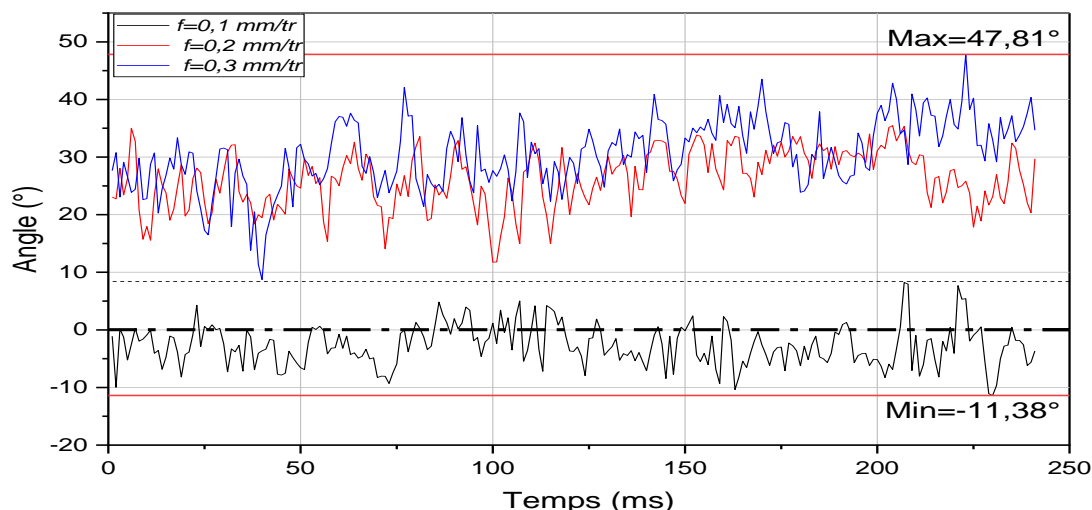


Figure 7 : Évolution de l'angle d'écoulement du copeau en fonction de l'avance f (mm/tr), $r=0,4$ mm, $V_c=30$ m/min.

Les angles mesurés se situent dans l'intervalle de $(8^\circ$ à $-11^\circ)$ lorsque l'avance est de $0,1$ mm/tr. Pour des avances de $0,2$ mm/tr et $0,3$ mm/tr, les angles varient de 8° à 47° . L'évolution des angles observée est similaire à celle obtenue avec un outil de rayon $r=0,8$ mm et une vitesse $V_c=30$ m/min. Cependant, pour une avance de $0,1$ mm/tr et un outil à rayon de bec $r=0,4$ mm, on note une importante diminution de l'angle, accompagné d'un changement de direction du copeau qui oscille horizontalement avec des angles positifs à 8° et négatifs à -11° .

La figure 8 synthétise les observations concernant l'influence du rayon de bec sur l'angle d'écoulement du copeau. Lorsque le rayon de bec est de $0,8$ mm, les angles d'écoulement sont principalement positifs, et le flux du copeau suit une direction constante avec un angle moyen de $14,54^\circ$. En revanche, pour un rayon de bec de $0,4$ mm, on observe un changement de direction dans l'écoulement du copeau, passant d'angles positifs à des angles négatifs, avec une moyenne de $-2,70^\circ$.

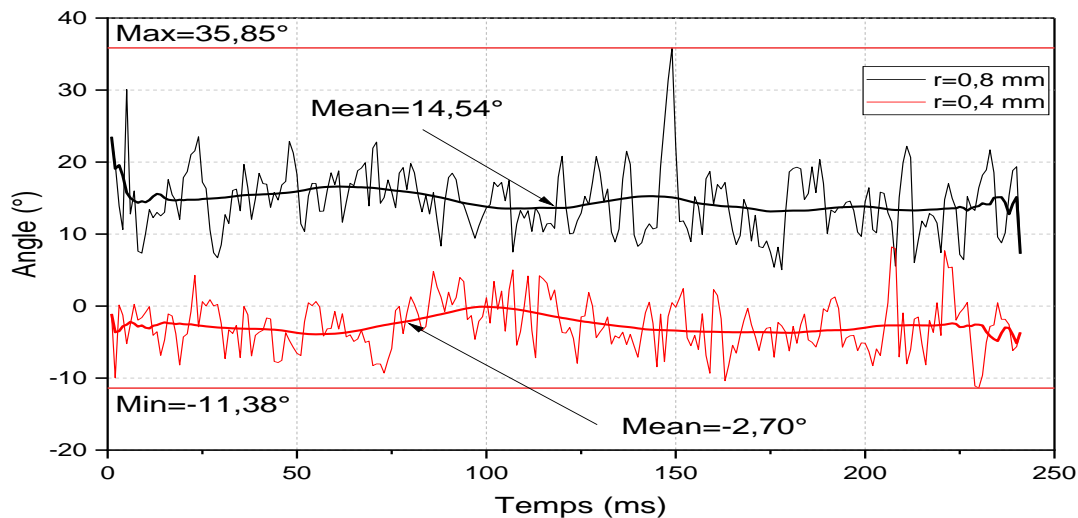


Figure 8 : Effet de rayon de bec de l'outil sur l'angle d'écoulement du copeau, $V=30$ m/min, $f=0,1$ mm/tr

3.2 Efforts de coupe

Le processus de coupe induit des frottements, des contraintes et des températures qui se manifestent à la fois dans le matériau de la pièce à usiner, sur l'outil de coupe et les copeaux. Les forces de coupe dans ce procédé se décomposent en deux composantes distinctes : la composante F_c (F_x), alignée avec la direction de coupe, et la composante F_f (F_y), orientée dans la direction des avances.

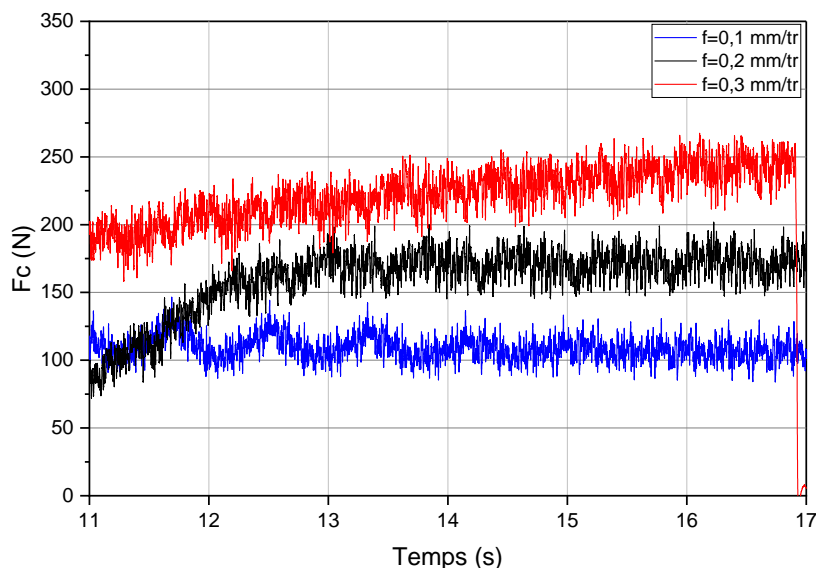


Figure 9 : L'effort de coupe F_c en fonction de l'avance f (mm/tr), $r=0,8$ mm, $V_c=30$ m/min

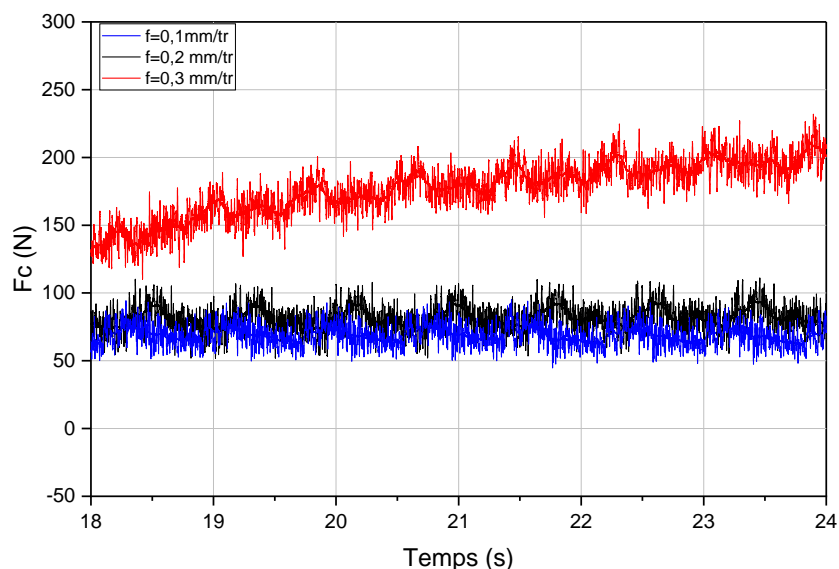


Figure 10 : L'effort de coupe F_c en fonction de l'avance f (mm/tr), $r=0,4$ mm, $V_c=30$ m/min

Les figures 9 et 10 montrent l'évolution de l'effort de coupe (F_c) en fonction de l'avance f pour les deux cas $r=0,8$ mm et $r=0,4$ mm avec $V_c=30$ m/min. Il est observé qu'un accroissement des avances entraîne une augmentation significative des efforts de coupe. Cette tendance est plus prononcée pour une avance $f=0,3$ mm/tr, où l'effort atteint les 250 N. Ces forces résultent des contraintes présentes dans le plan de cisaillement primaire, du frottement à l'interface entre l'outil et le copeau, ainsi que du frottement sur la face de dépouille, ces résultats sont en accord avec les résultats présentés par (Zouabi et al 2023).

L'effet du rayon de bec sur les efforts de coupe est notable, une diminution de l'effort F_c est observée lors de l'utilisation du rayon de bec $r=0,4$ mm par rapport au rayon $r=0,8$ mm. Cela est particulièrement marqué pour les avances $f=0,1$ mm/tr et $f=0,2$ mm/tr, où les valeurs passent de 170 N à 80 N pour $f=0,2$ mm/tr et de 120 N à 70 N pour $f=0,1$ mm/tr. Bien évidemment, cette évolution est conditionnée par l'évolution de la section de coupe.

3.3 Microstructures des copeaux

La difficulté lors d'une opération d'usinage en coupe oblique est de comprendre l'ensemble des phénomènes intervenant, dans notre cas les phénomènes induits par le rayon de bec où les épaisseurs de coupe évoluent sont proches des valeurs minimales engendrant une évolution des phénomènes de coupe. Pour obtenir ces phénomènes, les copeaux n'ont pas été analysés suivant la tranche comme fait traditionnellement, mais au travers du polissage de la face en contact avec la face de coupe de l'outil. Il est alors possible d'observer les bandes de cisaillement générées par l'arête principale et les bandes générées par le rayon de bec.

La Figure 11 présente la microstructure du copeau obtenu lors de l'usinage de la pièce au diamètre 110 mm avec $V_c=30$ m/min, $f=0,3$ mm et $r=0,8$ mm. Ces copeaux peuvent être classés comme des copeaux dentelés. Une première surface apparaît au microscope comme brillante et lisse (Figure 11-b), correspondant à la zone en contact avec la face de coupe, où le flux de copeaux a été observé. La seconde surface, qualifiée de rugueuse (Figure 11-c), présente des lamelles et est désignée comme la surface libre. Ces lamelles représentent la partie supérieure du copeau formée par le rayon de bec, où se forment les bandes de cisaillement adiabatiques (Zouabi et al 2023). Cela peut dire que la géométrie de l'outil de coupe (rayon de bec) influence directement sur la direction de l'écoulement du copeau.

La figure 12 présente l'effet de rayon de bec de l'outil sur la microstructure des copeaux obtenus à $V_c=30$ m/min et $f=0,3$ mm/tr pour les deux rayons 0,4 et 0,8 mm.

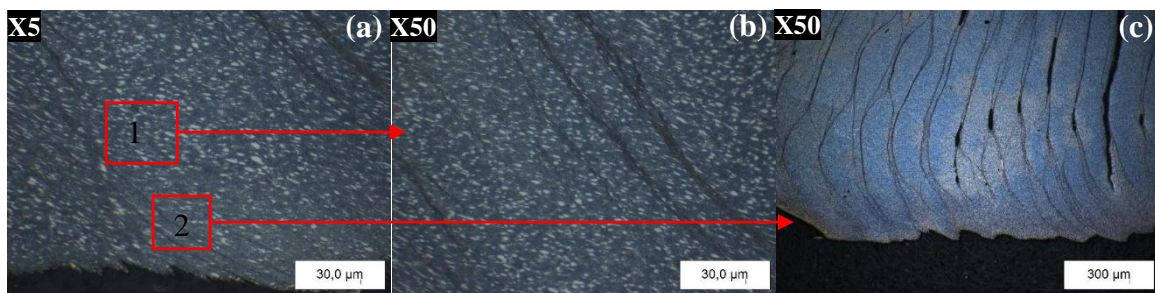


Figure 11 : Microstructure du copeau, (a) : surface du copeau, (b) : Agrandissement de la zone en contact avec la face de coupe de l'outil, (c) : Agrandissement de la face libre du copeau

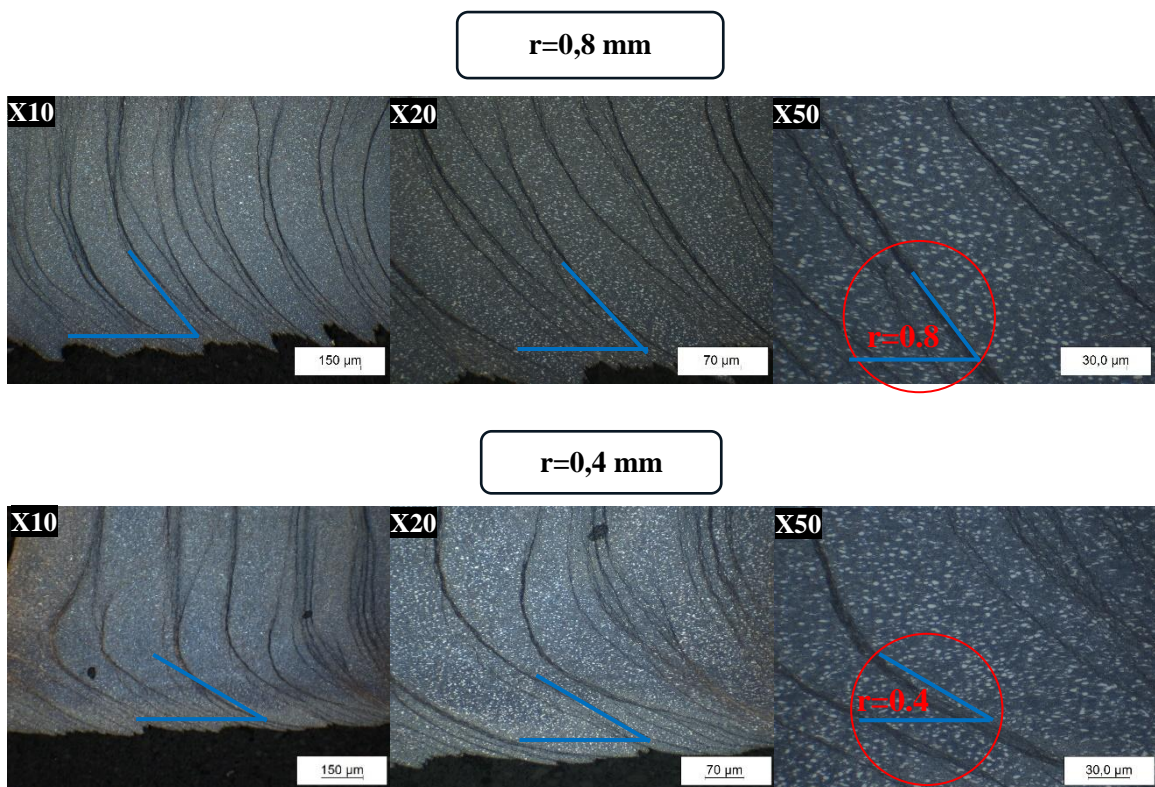
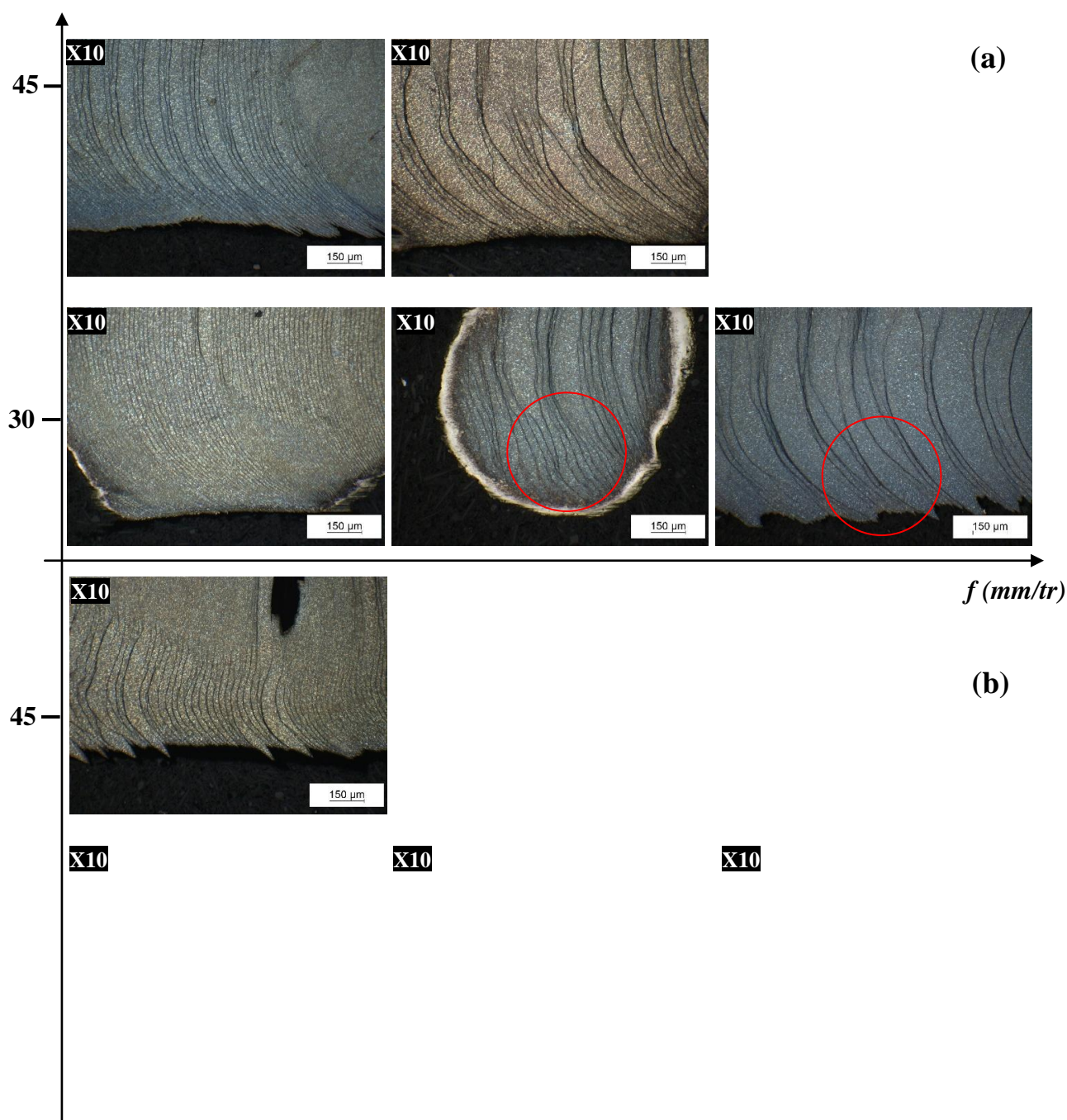


Figure 12 : Effet de rayon de bec sur la microstructure des copeaux avec $V_c=30$ m/min, $f=0,3$ mm/tr

La figure 13 présente l'ensemble des microstructures des copeaux en fonction de la vitesse de coupe V_c (m/min) et de l'avance f (mm/tr). On observe clairement l'influence du rayon de bec de l'outil sur le copeau, notamment pour l'avance de 0.3 mm/tr (indiquée par le cercle rouge). Cette observation renforce les résultats obtenus dans la section précédente concernant l'influence de l'avance et de rayon de bec sur l'angle d'écoulement. La variation de l'avance et de rayon de bec de l'outil modifie la vitesse et l'angle d'écoulement du copeau à cause, d'une part, par la pression normale à la pointe de l'outil et la longueur de contact outil-copeau et de l'autre côté la distribution des contraintes de cisaillement et de la température à l'interface outil-copeau.



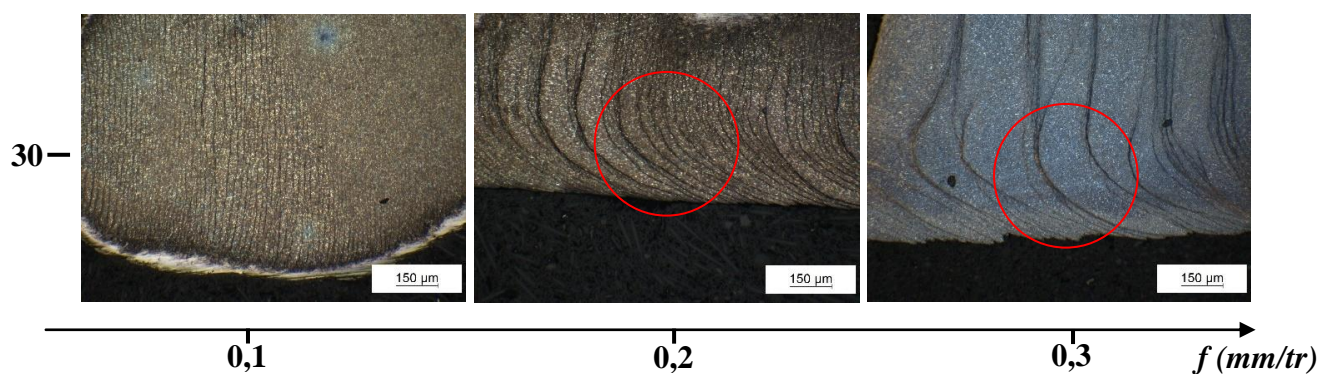


Figure 13 : microstructures des copeaux obtenus, (a) : $r=0,8$ mm, (b) : $r=0,4$ mm

Conclusion

Cet article met en lumière l'impact du rayon de bec et de l'avance de l'outil de coupe sur le flux des copeaux lors de l'usinage de l'alliage de titane Ti5553. La première phase de cette étude s'est concentrée sur la création d'un programme de traitement d'images provenant de la caméra rapide pendant le processus d'usinage, ainsi que sur la mesure de l'angle d'écoulement du copeau. Ensuite, une analyse des forces de coupe a été réalisée en tenant compte des conditions de coupe utilisées et de la géométrie de l'outil de coupe, en particulier le rayon de bec r (mm). Enfin, une observation microscopique des copeaux obtenus après chaque essai d'usinage a été effectuée. Les résultats obtenus sont synthétisés comme suit :

- Une augmentation de l'avance de l'outil de coupe, notée f (mm/tr), entraîne une augmentation de l'angle d'écoulement du copeau, surtout pour l'avance $f=0,3$ mm/tr. Cette dernière a également une incidence sur l'effort de coupe F_c .
- Le rayon de bec joue un rôle crucial dans la direction d'écoulement du copeau, avec des observations montrant des angles oscillants entre des valeurs positives et négatives, en particulier pour une avance de $f=0,1$ mm/tr. Des analyses ont également été effectuées pour évaluer son influence sur la microstructure du copeau.
- Les efforts de coupe sont très importants dans l'analyse de la direction de l'écoulement du copeau.

Des analyses supplémentaires restent à effectuer, portant sur la vitesse d'écoulement du copeau et l'impact du rayon de bec sur la topographie du copeau. Ces investigations seront menées dans les travaux futurs, constituant ainsi une extension de la présente étude.

Références

Childs, T. H. (2000). *Metal machining: theory and applications*. Butterworth-Heinemann, Elsevier, (pp. 35–80).

- Fang, N., & Jawahir, I. S. (2002). Analytical predictions and experimental validation of cutting force ratio, chip thickness, and chip back-flow angle in restricted contact machining using the universal slip-line model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(6), 681-694.
- Fang, N. (1998). An improved model for oblique cutting and its application to chip-control research. *Journal of Materials Processing Technology*, 79(1-3), 79-85.
- Fromentin, G., Gasparoux, J., Agbeviade, K., & Giovanola, J. H. (2016). Development of a precision machine to perform and study orthogonal micro-cutting. *Production Engineering*, 10, 217-226.
- Jared, B. H., & Dow, T. A. (2001). Investigation of the direction of chip motion in diamond turning. *Precision engineering*, 25(2), 155-164.
- Kishawy, H. A., Li, L., & El-Wahab, A. I. (2006). Prediction of chip flow direction during machining with self-propelled rotary tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12-13), 1680-1688.
- Merchant, M. E. (1945). *Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip.* *Journal of applied physics*, 16(5), 267-275.
- Moufki, A., Dudzinski, D., Molinari, A., & Rausch, M. (2000). Thermoviscoplastic modelling of oblique cutting: forces and chip flow predictions. *International Journal of Mechanical Sciences*, 42(6), 1205-1232.
- Okushima, K., & Minato, K. (1959). On the behavior of chip in steel cutting. *Bulletin of JSME*, 2(5), 58-64.
- Oxley, P. L. B., & Welsh, M. J. M. (1964). Calculating the shear angle in orthogonal metal cutting from fundamental stress-strain-strain rate properties of the work material.
- Pottier, T., Germain, G., Calamaz, M., Morel, A., & Coupard, D. (2014). Sub-millimeter measurement of finite strains at cutting tool tip vicinity. *Experimental Mechanics*, 54, 1031-1042.
- Stabler, G. V. (1951). The fundamental geometry of cutting tools. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 165(1), 14-26.
- Strenkowski, J. S., Shih, A. J., & Lin, J. C. (2002). An analytical finite element model for predicting three-dimensional tool forces and chip flow. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(6), 723-731.
- Sutter, G. (2005). Chip geometries during high-speed machining for orthogonal cutting conditions. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(6), 719-726.
- Usui, E., & Hirota, A. (1974). An energy approach to mechanics of three-dimensional metal cutting. In *Proc. Int. Conf. Prod. Eng., Japanese Society of Precision Engineering* (pp. 541-546).
- Wagner, V., Baili, M., & Dessein, G. (2015). The relationship between the cutting speed, tool wear, and chip formation during Ti-5553 dry cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76, 893-912.
- Wang, J., & Mathew, P. (1995). Development of a general tool model for turning operations based on a variable flow stress theory. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35(1), 71-90.
- Young, H. T., Mathew, P., & Oxley, P. L. B. (1987). Allowing for nose radius effects in predicting the chip flow direction and cutting forces in bar turning. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 201(3), 213-226.

Zouabi, H., Calamaz, M., Wagner, V., Cahuc, O., & Dessein, G. (2023). Kinematic fields measurement during Ti-6Al-4V chip formation using new high-speed imaging system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-19.