



HAL
open science

Etude expérimentale de la relation entre la morphologie du copeau et la réponse mécanique en coupe orthogonale

Antoine Pouliquen, Charles Mareau, Linamaria Gallegos Mayorga, Yessine Ayed,
Guénaël Germain

► **To cite this version:**

Antoine Pouliquen, Charles Mareau, Linamaria Gallegos Mayorga, Yessine Ayed, Guénaël Germain. Etude expérimentale de la relation entre la morphologie du copeau et la réponse mécanique en coupe orthogonale. Conference Manufacturing21, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay [ENS Paris Saclay], Oct 2022, Gif Sur Yvette, France. <hal-04011746>

HAL Id: hal-04011746

<https://hal.science/hal-04011746v1>

Submitted on 2 Mar 2023

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.



HAL Authorization



Etude expérimentale de la relation entre la morphologie du copeau et la réponse mécanique en coupe orthogonale

Antoine POULIQUEN^{(a)*}, Linamaria GALLEGOS-MAYORGA^(a),
Charles MAREAU^(a), Yessine AYED^(a), Guénaél GERMAIN^(a)

(a) LAMPA, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Campus d'Angers, 2
boulevard du Ronceray, 49100 Angers – France
Mail : antoine.pouliquen@ensam.eu

Résumé : L'usinage est très utilisé dans l'industrie. La compréhension des phénomènes physiques qui aboutissent à la formation du copeau est essentielle afin d'améliorer la qualité des pièces fabriquées. Cependant le lien entre la morphologie du copeau et les efforts mis en jeu est encore mal compris. L'objectif du présent travail, qui s'inscrit dans le cadre du projet ANR DEMUTI, est d'étudier le lien entre la morphologie du copeau et la réponse mécanique, en particulier les efforts de coupe, au cours de la coupe orthogonale d'un alliage de titane.

Pour répondre à cette problématique, une méthode originale est proposée pour traiter l'information issue d'essais de coupe orthogonale. Ces essais sont menés sur un banc instrumenté permettant de réaliser des coupes à des vitesses variables (jusqu'à 24 m.min⁻¹) à une profondeur de passe fixe ($f=0,25$ mm). L'enregistrement des efforts en pointe d'outil est assuré par un dynamomètre Kistler. Deux caméras rapides (Photron Nova S6) associées à un objectif Navitar à fort grossissement permettent d'observer la formation du copeau à une résolution de 2,9 $\mu\text{m}/\text{px}$ et une fréquence d'acquisition de 30 000 im.s⁻¹.

Une reconstruction spatio-temporelle du copeau est ensuite réalisée à partir des images obtenues. Une segmentation sémantique par apprentissage profond permet de déterminer l'évolution de l'épaisseur du copeau au cours du temps. Une analyse fréquentielle des signaux d'effort et d'épaisseur montre une similarité des distributions spectrales pour un même essai. Enfin, la vitesse d'écoulement du copeau est déterminée à partir de segments de copeau observés à des instants différents.

Mots clés : Alliages de titane, Coupe Orthogonale, Apprentissage profond, Usinage, Imagerie Grande Vitesse, observations *in-situ*

1 Introduction

Grâce à des propriétés mécaniques élevées couplées à une faible densité et une bonne résistance à la corrosion, les alliages de titane sont largement utilisés dans l'industrie aéronautique. Cependant, ces propriétés associées à une faible conductivité thermique engendrent une usinabilité faible comparée à d'autres alliages métalliques (Niknam, 2014).

Afin de faciliter les opérations d'usinage, différentes études expérimentales ont été menées pour identifier et contourner les difficultés. La productivité peut être améliorée en optimisant le procédé. Suivant cette démarche, Barry *et al.* (2001) et Nouari *et al.* (2008) ont montré que la vitesse de coupe, la profondeur de passe et la géométrie de l'outil de coupe impactent les efforts de coupe, la morphologie du copeau et l'usure de l'outil. Kaynak *et al.* (2018) ont souligné le bénéfice au recours à l'assistance à l'usinage. L'optimisation de la microstructure peut aussi permettre une meilleure usinabilité. Différentes études ont en effet souligné l'impact de la microstructure et de la fraction volumique de phase (Ramirez, 2017 ; Joshi *et al.*, 2014) sur les efforts de coupe et la morphologie de copeau.

L'étude présentée ici, qui s'inscrit dans le projet ANR DEMUTI (DEsign de Microstructure et Usinabilité d'un alliage de Titane beta métastable), vise à évaluer la dépendance de la réponse mécanique à la morphologie du copeau en coupe orthogonale. L'objectif est alors de déterminer si contrôler la microstructure permettrait de maîtriser la réponse mécanique d'un alliage de titane.

Cet article est articulé en trois parties. Dans un premier temps, les microstructures et la méthode pour acquérir et analyser les données sont introduites. Ensuite, les résultats obtenus et les discussions engendrées sont détaillées. Pour finir, les conclusions et perspectives de ces travaux sont exposées.

2 Matériau et méthode

2.1 Matériau et microstructures

Afin d'étudier l'impact de la microstructure sur la formation du copeau, quatre microstructures différentes ont été générées à partir d'un même alliage de titane β -métastable, le Ti5553. La première, appelée par la suite 100% β , est composée exclusivement de phase β (Figure 1 (a)). Deux autres possèdent respectivement 30% et 55% de phase α_{wi} lamellaire intragranulaire (Figure 1 (b) et (c)). Elles sont nommées 30% α_{wi} et 55% α_{wi} . Ces microstructures ont été choisies afin d'étudier l'influence de la fraction volumique de phase α pour une morphologie de particules fixée. Une quatrième microstructure, composée de 55% de phase α secondaire (55% α_s), est choisie pour analyser l'influence de la morphologie des particules α .

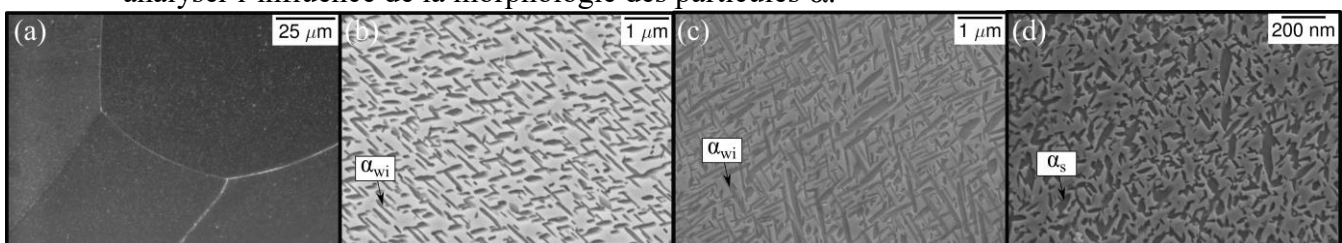


Figure 1 : Micrographie des microstructures (a) 100% β , (b) 30% α_{wi} , (c) 55% α_{wi} , (d) 55% α_s

Pour chacune des microstructures, un échantillon de longueur de 65 mm, de hauteur 40 mm et de largeur de coupe nominale $l_c = 2,5$ mm a été poli et attaqué à l'aide d'une solution corrosive ($10\text{H}_2\text{SO}_4 + 5\text{HF} + 85\text{H}_2\text{O}$ % vol.).

2.2 Dispositif expérimental

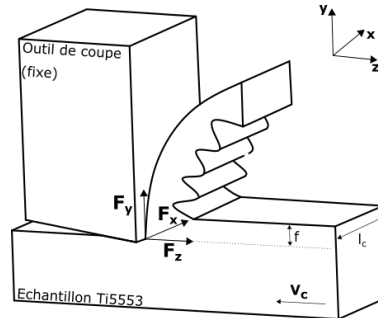


Figure 2 : Principe expérimental du procédé de rabotage

Afin d'analyser la réponse mécanique de ces microstructures pendant l'usinage, des essais de rabotage ont été réalisés pour chacune d'entre-elles. Ce procédé a été choisi afin de faciliter l'observation des faces latérales tout en restant représentatif des conditions industrielles. Le principe de l'essai repose sur un outil fixe vers lequel l'échantillon se déplace afin de réaliser la coupe (Figure 2). Dans cette étude, la profondeur de passe, la largeur de coupe, l'effort de coupe et la vitesse de coupe sont respectivement notés f , l_c , F_z et V_c .

Les essais de rabotage sont réalisés à l'aide d'un banc d'essai développé au sein du laboratoire (Figure 3).

Un vérin électrique permet de réaliser les essais à des vitesses de coupe allant jusqu'à $24 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. L'outil utilisé en nuance SECO carbure WC-6%Co à grains fins possède un angle de coupe de 0° et un angle de dépouille de $7,5^\circ$. Une vis micrométrique positionnée sur le porte-outil permet de réaliser des essais à une profondeur de passe f de 0,25 mm.

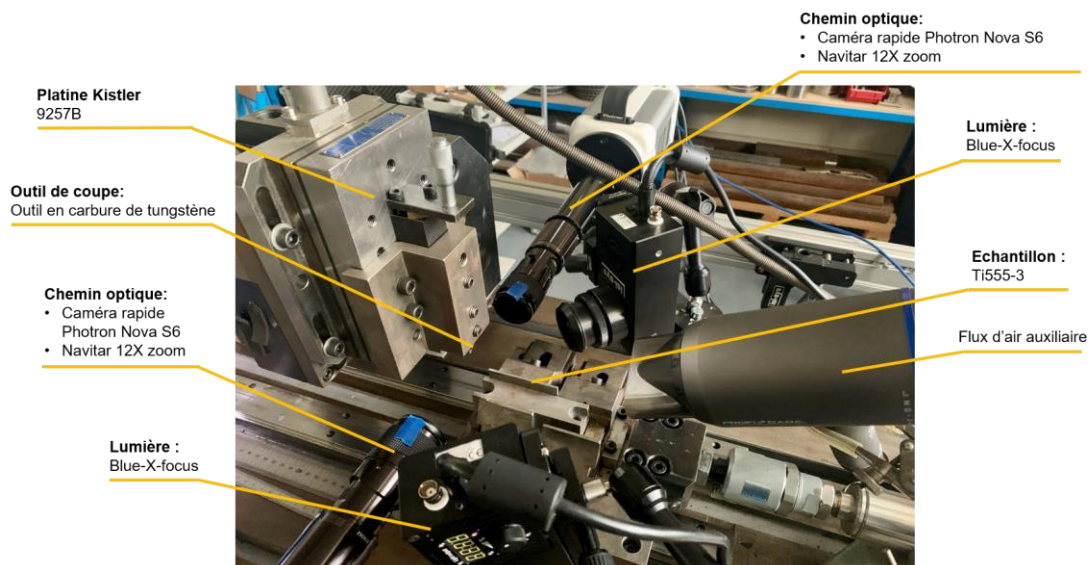


Figure 3 : Dispositif expérimental

Le porte-outil est fixé sur un dynamomètre Kistler 9257B afin de mesurer les trois composantes de l'effort. Des observations post-mortem ont montré que la morphologie des copeaux varie significativement dans la direction de la largeur de coupe. Par

conséquent, afin de limiter la perte de données, deux caméras rapides Photron NOVA S6 sont positionnées de part et d'autre de l'échantillon. Pour être en mesure d'observer les phénomènes se passant à petite échelle, ces caméras sont couplées à un objectif Navitar 12X permettant d'atteindre des résolutions allant de 3,5 à 2,9 $\mu\text{m}/\text{px}$ et 512x384 px². La fréquence d'acquisition est fixée à 30 kHz pour les caméras et le dynamomètre afin de synchroniser les images avec les mesures d'efforts. Un déclencheur manuel est utilisé pour permettre l'activation simultanée des instruments de mesure. Deux sources de lumières Blue-X-Focus (ISI-SYS GmbH) permettent un éclairage intense et focalisé sur la zone en pointe d'outil.

Deux à trois essais de coupe orthogonale ont été réalisés par microstructure avec une profondeur de passe nominale de 0,25 mm et une vitesse de coupe de 6 m.min⁻¹.

2.3 Traitement des données expérimentales

2.3.1 Signaux d'efforts

La mesure des efforts de coupe reposant sur des capteurs piézo-électriques, une dérive linéaire peut être observée. Une correction affine à l'aide des premiers et derniers points enregistrés (avant et après la coupe) est donc effectuée sur le signal d'efforts mesuré. De plus, les différents essais ne possèdent pas une profondeur de passe f et une largeur de coupe l_c strictement égales. En conséquence, une normalisation de l'effort de coupe F_z est alors réalisée selon la relation suivante :

$$F_z = F'_z \times \frac{l_c}{l'_c} \times \frac{f}{f'} \quad (1)$$

avec F_z , l_c et f (respectivement F'_z , l'_c et f') les valeurs nominales (respectivement actuelles) de l'effort de coupe, de la largeur de coupe et de la profondeur de passe.

2.3.2 Détermination de l'épaisseur de copeau

L'acquisition à haute fréquence (30 kHz) d'images numériques de la formation du copeau génère une quantité de données importante (environ 5 Go par caméra pour un essai réalisé à 6 m.min⁻¹). Il est donc nécessaire de disposer d'une méthode automatique de traitement des images. Dans le but de déterminer l'épaisseur du copeau, la stratégie de reconstruction spatio-temporelle du copeau introduite par Jähne (1993) est adoptée.

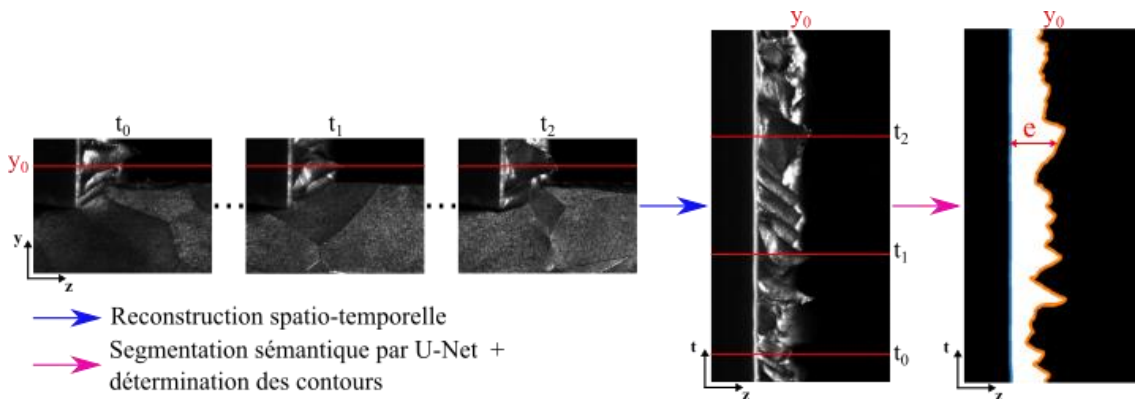


Figure 4 : Reconstruction spatio-temporelle et détermination de l'épaisseur de copeau

Pour chaque image, donc à chaque instant t , une ligne de pixels à une ordonnée fixée (notée y_0) est prise en compte. Ces lignes sont ensuite accolées les unes aux autres en fonction du temps pour construire une image spatio-temporelle du copeau formé au cours d'un essai de rabotage (Figure 4). Les images enregistrées avec les caméras rapides possédant peu de contraste, les contours du copeau reconstruit ne sont pas faciles à déterminer. Une segmentation sémantique par apprentissage profond basé sur l'algorithme U-Net (Ronneberger, 2015) a été choisie pour distinguer la matière de l'arrière-plan et de l'outil. Le problème étudié présentant une complexité relativement faible, un réseau U-Net simplifié inspiré des travaux de Cordeiro (2020) a été privilégié pour séparer le copeau du reste de l'image.

L'efficacité d'un tel réseau est dépendante d'une phase d'entraînement. Pour cette étude, 372 images et les masques associés (réalisés manuellement) ont été utilisées pour l'entraînement alors que 61 images ont servi à la validation. Au cours de cette étape, les masques générés par le modèle ont été comparés à ceux créés manuellement en évaluant la valeur moyenne et l'écart-type de l'épaisseur à différentes epochs de l'entraînement. Les erreurs obtenues sur ces deux grandeurs sont respectivement de $7 \mu\text{m}$ et $4,5 \mu\text{m}$.

Cette procédure permet alors de déterminer l'évolution de l'épaisseur du copeau au cours du temps.

2.3.3 Détermination de la vitesse d'écoulement

En réalisant deux coupes spatio-temporelles à des ordonnées différentes, deux signaux de l'épaisseur du copeau décalés dans le temps sont obtenus (Figure 5). Ce décalage temporel δt est, dans un premier temps, évalué sur tout l'essai grâce à une corrélation croisée. La vitesse d'écoulement V_e est ensuite calculée grâce à :

$$V_e = \frac{d(y_0, y_1)}{\delta t} \quad (2)$$

avec $d(y_0, y_1)$ la distance entre les deux ordonnées servant aux reconstructions spatio-temporelles et δt l'écart temporel moyen entre les deux signaux

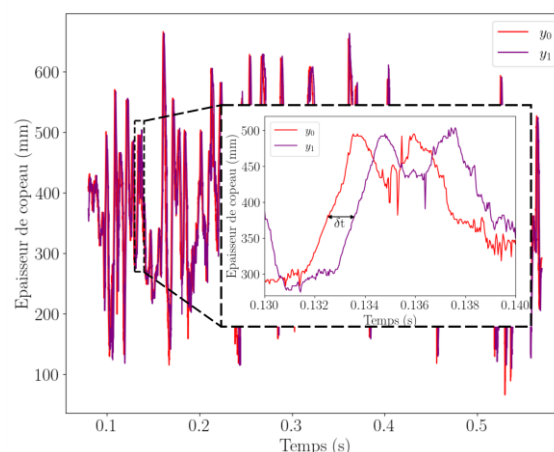


Figure 5 : Détermination de la vitesse d'écoulement pour un essai de rabotage à $V_c = 6 \text{ m.min}^{-1}$ pour la microstructure 55% α_{wi}

Au cours d'un essai de rabotage, la vitesse d'écoulement de la matière peut fluctuer assez largement autour de la moyenne. Il est possible d'évaluer ces variations en déterminant la vitesse d'écoulement locale au cours de l'essai. Une portion du signal de

référence (y_0) est comparée sur une plage au second signal (y_1) en testant les différents écarts temporels possibles. Le décalage optimal est déterminé lorsque l'erreur quadratique entre la portion de référence et celle du second signal est minimale. La taille de la fenêtre analysée est fixée à 125 points de mesure centrés sur l'instant à étudier

La vitesse d'écoulement a aussi été déterminée par corrélation d'images numériques à l'aide du logiciel VIC-2D de façon locale, une telle technique ne permet pas l'analyse de l'essai dans sa globalité car elle n'est pas applicable à chaque image et les délais ne sont pas raisonnables. Les grandes déformations observées lors de la formation du copeau imposent l'utilisation de la corrélation incrémentale. De plus, appliqué un mouchetis sur la pièce est compliqué. Par conséquent, les surfaces polies et attaquées des échantillons réalisent cette fonction. Ces motifs microstructuraux ne sont pas toujours visibles et reconnaissables tout au long de la coupe. La largeur des facettes étudiés est de 17 px.

Grâce aux différentes méthodes présentées précédemment, il est possible de déterminer en fonction du temps l'évolution de l'effort de coupe ainsi que l'épaisseur du copeau et la vitesse d'écoulement (Figure 6). Cependant, les différents signaux ne correspondent pas exactement au même instant de la formation du copeau. De ce fait, une analyse fréquentielle a été développée pour compléter une première approche temporelle. Afin de s'affranchir des effets de bord, les dix premiers et derniers millimètres des essais ne sont pas pris en compte dans l'analyse.

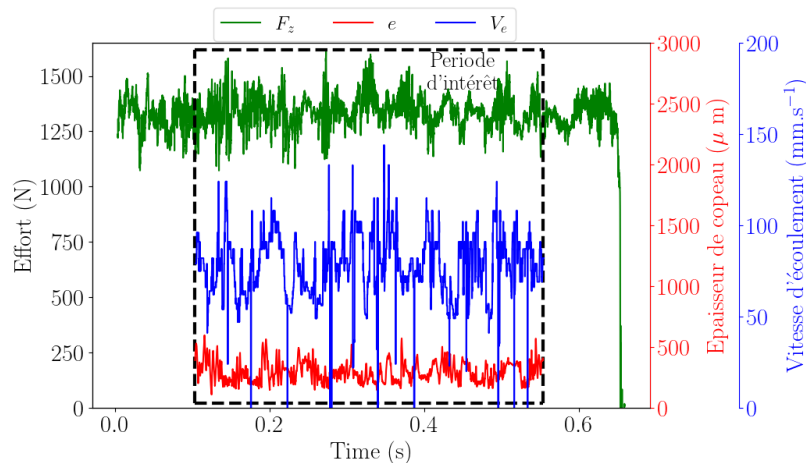


Figure 6 : Résumé des signaux temporels pour un essai de rabotage à $V_c = 6 \text{ m.min}^{-1}$ pour la microstructure 55% α_{wi}

2.3.4 Analyse temporelle et fréquentielle des signaux

Analyse temporelle – Les signaux obtenus avec les essais de rabotage sont composés de N points également espacés dans le temps. Afin de comparer différents signaux, la valeur moyenne \bar{a} d'une quantité $a(t)$ est alors donnée par :

$$\bar{a} = \frac{\sum_0^{t_N} a(t)}{N} \quad (3)$$

Analyse fréquentielle - Pour un signal temporel (appelé a), sa représentation dans le domaine fréquentiel (appelée A) est obtenue grâce à la transformée de Fourier rapide. La densité d'énergie spectrale S_a , qui donne une estimation de l'énergie contenue dans le signal pour une fréquence f , est ensuite évaluée à partir de la transformée de Fourier par la relation suivante :

$$S_a(f) = \frac{A(f) \times A^*(f)}{N^2} \quad (4)$$

où N est le nombre total de fréquence et A^* le conjugué de A .

Afin d'évaluer comment l'énergie est distribuée au sein du signal, la fonction de répartition C_a associée à la densité d'énergie spectrale S_a est calculée avec :

$$C_a(f) = \frac{\sum_0^f S_a(f')}{\sum_0^{f_{max}} S_a(f')} \quad (5)$$

Afin d'illustrer la méthode, les densités d'énergie spectrale de l'effort de coupe F_z et de l'épaisseur du copeau e ainsi que les fonctions de répartition associées sont représentées dans la Figure 7 pour un essai sur la microstructure 55% α_{wi} . Afin de comparer deux signaux temporels (a et b), la valeur du test de Kolmogorov-Smirnov $D_{a,b}$ (Massey, 1951) est évaluée pour déterminer si les distributions fréquentielles sont proches. Comme montré sur la Figure 7, cette grandeur est déterminée à partir des fonctions de répartition C_a et C_b par la relation suivante :

$$D_{a,b} = \max_f |C_a(f) - C_b(f)| \quad (6)$$

Deux distributions fréquentielles sont identiques si la valeur de ce test est nulle.

Aussi, pour évaluer la répartition des fréquences au sein d'un signal, la fréquence caractéristique f_{90} a été déterminée pour chaque signal. Elle correspond à la fréquence pour laquelle la fonction de répartition atteint 90%. Cette fréquence caractéristique indique alors si les hautes ou basses fréquences sont prédominantes dans le signal considéré.

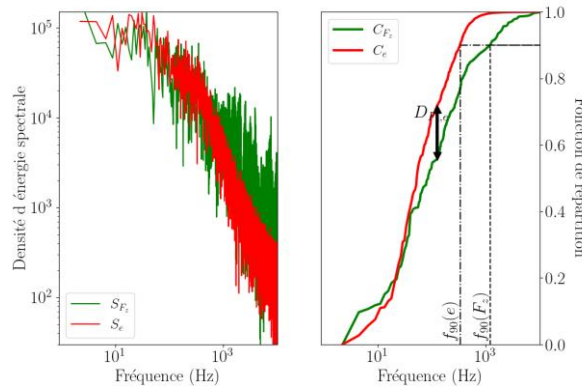


Figure 7: Représentation et comparaison de (a) la densité d'énergie spectrale et de (b) la fonction de répartition pour l'effort de coupe F_z et l'épaisseur de copeau e pour un essai à

$$V_c = 6 \text{ m.min}^{-1} \text{ pour la microstructure } 55\% \alpha_{wi}$$

3 Résultats et discussion

La valeur moyenne pour chaque microstructure de l'effort de coupe, de l'épaisseur de copeau et de la vitesse d'écoulement en fonction de la dureté est représentée dans la (Figure 8).

Il n'existe pas de lien direct entre les efforts de coupe et la dureté mesurés pour chaque microstructure. En effet, des efforts élevés sont observés pour les microstructures ayant la dureté soit la plus importante soit la plus faible. En revanche, il est possible d'observer qu'avec une dureté croissante la vitesse d'écoulement a tendance à augmenter et l'épaisseur du copeau à décroître.

Ces résultats suggèrent donc que l'effort de coupe est conditionné par deux phénomènes en compétition. D'un côté, la contrainte d'écoulement d'un matériau dur engendre un effort de coupe élevé. De l'autre, le volume de matière déformé augmente lorsqu'une microstructure est molle causant un effort de coupe important. Il existe alors une dureté optimale lorsqu'il s'agit de réduire les efforts de coupe.

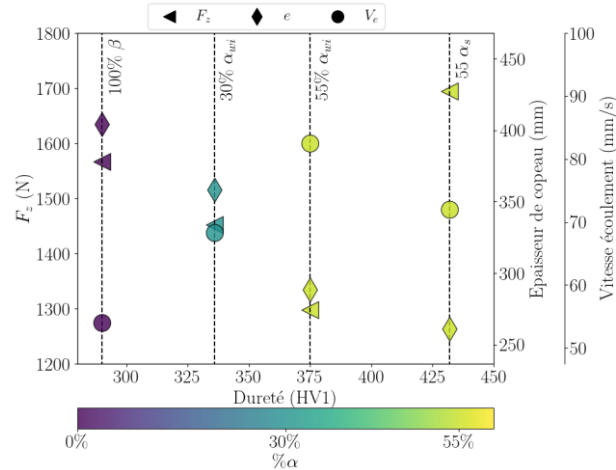


Figure 8 : Evolution de l'effort de coupe, de l'épaisseur du copeau et de la vitesse d'écoulement en fonction de la dureté

L'analyse spectrale permet d'évaluer les différences de variations entre les signaux d'effort de coupe et d'épaisseur de copeau complétant ainsi l'analyse des valeurs moyennes. Les valeurs du coefficient de Kolmogorov-Smirnov $D_{F_z, e}$ sont présentées dans le Tableau 1 pour indiquer la similarité fréquentielle entre l'effort de coupe et l'épaisseur de copeau. Les valeurs diagonales de cette matrice sont basses indiquant alors que pour une microstructure donnée les réponses fréquentielles de ces grandeurs sont proches. Un tel résultat suggère donc que la réponse mécanique d'un essai est liée à la morphologie du copeau. Cette observation fait écho aux résultats présentés par Joshi (2014). En effet, leur étude fait état de fréquences proches en comparant la segmentation du copeau aux efforts de coupe.

De plus, le coefficient de Kolmogorov-Smirnov $D_{F_z, e}$ reste faible pour les microstructures possédant 55% de phase α et des morphologies de particules différentes. Cette observation permet de souligner le rôle prépondérant de la fraction volumique de phase α sur la réponse mécanique lors de l'usinage.

Tableau 1 : Coefficients de Kolmogorov-Smirnov $D_{F_z, e}$ obtenue en comparant les réponses fréquentielles de l'effort de coupe et de l'épaisseur de copeau

		Effort de coupe F_z			
		100% β	30% α_{wi}	55% α_{wi}	55% α_s
Épaisseur de copeau e	100% β	0,09	0,29	0,46	0,45
	30% α_{wi}	0,26	0,11	0,32	0,32
	55% α_{wi}	0,47	0,38	0,13	0,10
	55% α_s	0,43	0,35	0,23	0,20

Les fréquences caractéristiques f_{90} déterminées pour l'effort de coupe et l'épaisseur de copeau sont représentées sur la Figure 9. Nous constatons que les fréquences caractéristiques varient largement. Trois groupes se distinguent en fonction de la fraction volumique de phase α . Les fréquences caractéristiques les plus faibles sont obtenues pour la microstructure 100% β pour laquelle aucun détail microstructural n'est présent. A l'opposé, les fréquences caractéristiques les plus élevées correspondent aux microstructures avec 55% de phase α pour lesquelles les variations microstructurales sont les plus fréquentes.

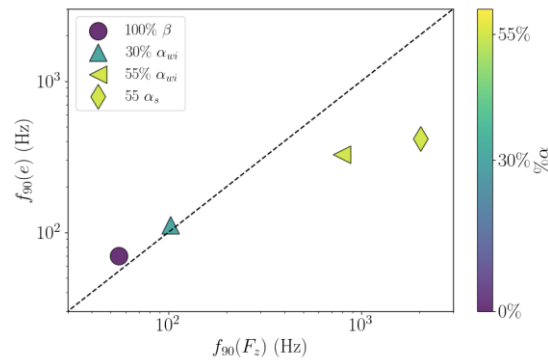


Figure 9 : Fréquences caractéristiques obtenues pour l'effort de coupe et l'épaisseur de copeau pour les différents essais étudiés

Bien qu'obtenues par des mesures indépendantes reposant sur des principes physiques différents, les fréquences caractéristiques des deux grandeurs sont proches pour les microstructures 100% β et 30% α_{wi} . En revanche, pour les microstructures composées à 55% de phase α , les fréquences caractéristiques de l'effort de coupe sont plus élevées que celles associées à l'épaisseur.

Afin de vérifier si la morphologie du copeau permet de déterminer la réponse cinématique d'un essai de coupe orthogonale, les valeurs de vitesse d'écoulement locales sont comparées à des mesures réalisées par corrélation d'images numériques sur la Figure 10. Les vitesses déterminées par corrélation d'images servent à la validation de la méthode développée à l'aide de la coupe spatio-temporelle. Nous constatons que la méthode fonctionne sur la majorité de l'essai. Cependant, le signal obtenu possède quelques instabilités avec des valeurs de vitesse d'écoulement aberrantes car trop rapides.

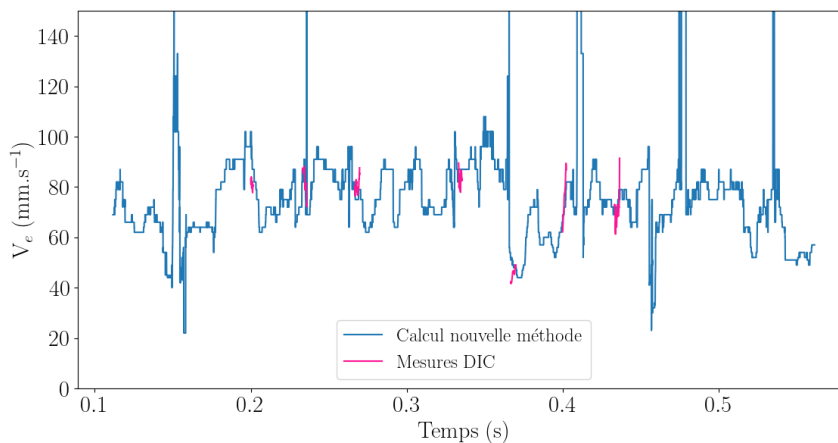


Figure 10 : Comparaison de la vitesse d'écoulement obtenue pour les deux méthodes pour un essai à $V_c = 6 \text{ mm.min}^{-1}$ pour la microstructure 55% α_s

Ceci peut être le résultat d'un signal épaisseur constant rendant difficile la détermination du décalage temporel ou bien d'un artefact perturbant la segmentation d'images et différenciant les deux signaux d'épaisseur.

La Figure 11 représente la répartition de l'erreur absolue sur la vitesse d'écoulement obtenues avec la méthode basée sur la coupe spatio-temporelle en considérant les mesures en corrélation d'images comme référence. La valeur moyenne et la médiane de l'erreur sont représentées respectivement par la barre rouge et la barre noire. La valeur médiane est faible avec un maximum pour la microstructure 55% α_{wi} de 7,5 mm.s^{-1} . La valeur moyenne, plus affectée par des résultats aberrants peut s'avérer élevée en comparaison aux vitesses d'écoulement recherchées.

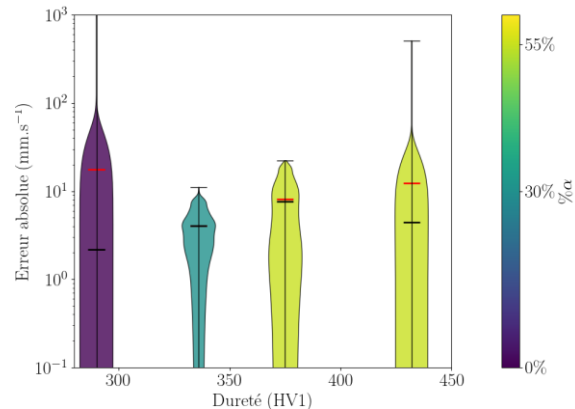


Figure 11 : Répartition de l'erreur absolue entre les deux méthodes de mesures de la vitesse d'écoulement, les barres rouges et noires représentent respectivement la valeur moyenne et médiane

Cette nouvelle méthode de calcul de la vitesse d'écoulement locale est ainsi validée afin d'évaluer qualitativement la réponse cinématique de la coupe au cours d'une opération de rabotage.

4 Conclusions et perspectives

Dans cette étude, le lien entre la réponse mécanique et la morphologie du copeau a été analysé pour différentes microstructures de l'alliage de titane Ti5553 pour une opération de coupe orthogonale. A cette fin, quatre microstructures avec deux types de morphologie de phase α et des fractions volumiques de phase différentes ont été testées. Un banc d'essai instrumenté constitué de deux caméras rapides et d'un dynamomètre a été développé. Une procédure originale de post-traitement des données basées sur l'intelligence artificielle afin de déterminer l'évolution de l'épaisseur de copeau et de la vitesse d'écoulement en fonction du temps a été mis au point. De plus, une étude fréquentielle a été réalisée afin d'évaluer la similitude entre deux signaux. Les résultats indiquent que :

- La dureté et les efforts de coupe ne peuvent pas être directement liées. D'un côté des microstructures molles génèrent un volume déformé important augmentant les efforts. De l'autre, la contrainte d'écoulement des microstructures dures génère des efforts de coupe élevés.
- Les variations de l'effort de coupe et de l'épaisseur de copeau pendant un essai dépendent de la microstructure et de la fraction volumique de phase α .
- Les distributions fréquentielles de l'effort et de l'épaisseur de copeau sont proches pour une même microstructure. Les deux grandeurs sont donc corrélées.

- La morphologie du copeau permet d'obtenir qualitativement la vitesse d'écoulement du copeau et ses variations.

Les travaux futurs se focaliseront sur deux axes principaux. Dans un premier temps, la méthode de calcul de la vitesse d'écoulement sera améliorée en exploitant le principe d'une fenêtre à taille variable. Ensuite, la procédure de post-traitement sera utilisée afin de déterminer la sensibilité à la vitesse de coupe. De plus, les résultats expérimentaux serviront de base à une comparaison avec des résultats numériques pour déterminer si les modèles numériques à l'échelle polycristalline (Boubaker, 2019) sont pertinents dans le cadre de l'usinage.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du projet ANR DEMUTI pour le soutien financier ainsi que TIMET Savoie et SECO Tools AB pour leur soutien technique et matériel. Les auteurs remercient toutes les personnes ayant contribué à cette recherche, en particulier Quentin Hatte et l'équipe Cassiopée HPC qui ont aidé à l'implémentation et au développement des différentes analyses et expériences.

Références

- J. Barry, G. Byrne, D. Lennon (2001) *Observations on chip formation and acoustic emission in machining Ti-6Al-4V alloy*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol 41, pp.1055-1070
- H.B. Boubaker (2019) *Développement d'une modélisation à l'échelle cristalline d'un alliage de titane pour la simulation de l'usinage*, Thèse, Université d'Angers
- M. Cordeiro (2020) *Creating a Very Simple U-Net Model with PyTorch for Semantic Segmentation of Satellite Images*, <https://medium.com/analytics-vidhya/creating-a-very-simple-u-net-model-with-pytorch-for-semantic-segmentation-of-satellite-images-223aa216e705>
- B. Jähne (1993) *Motion in space-time images*, *Spatio-Temporal Image Processing: Theory and Scientific Applications*, pp.76-109
- S. Joshi, P. Pawar, A. Tewari, S.S. Joshi (2014) *Effect of β phase fraction in titanium alloys on chip segmentation in their orthogonal machining*, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 7, pp.191-201
- Y. Kaynak, A. Gharibi, M. Ozkutuk (2018) *Experimental and numerical study of chip formation in orthogonal cutting of Ti-5553 alloy: the influence of cryogenic, MQL, and high-pressure coolant supply*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.94, pp.1411-1428
- F.J. Massey (1951) *The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit*, *Journal of the American Statistical Association*, vol.46, pp.68-78
- S.A. Niknam, R. Khettabi, V. Songmene (2014) *Machinability and Machining of Titanium Alloys: A Review*, *Machining of Titanium Alloys*, pp.1-30
- M. Nouari, M. Calamaz, F. Girot (2008) *Mécanismes d'usure des outils coupants en usinage à sec de l'alliage de titane aéronautique Ti-6Al-4V*, *Comptes Rendus Mécanique*, vol.336, pp.772-781
- C. Ramirez (2017) *Optimization criteria of titanium alloys to improve their machinability*, *Theses, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers – ENSAM*
- O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox (2015) *U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation*, *Medical image computing 484 and computer-assisted intervention*, vol.9351, pp.234-241