



**HAL**  
open science

# Etude de l'influence de la micro-géométrie d'arête sur les chargements mécaniques et les contraintes résiduelles lors d'une opération de fraisage de finition du Ti-6Al-4V

Matthieu Paillard, Gérard Poulachon, Frédéric Rossi, Hélène Birembaux,  
Mathieu Ritou, Nils Voltaire, Nicolas Maury

## ► To cite this version:

Matthieu Paillard, Gérard Poulachon, Frédéric Rossi, Hélène Birembaux, Mathieu Ritou, et al.. Etude de l'influence de la micro-géométrie d'arête sur les chargements mécaniques et les contraintes résiduelles lors d'une opération de fraisage de finition du Ti-6Al-4V. Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, GRENOBLE, France. hal-04784361

**HAL Id: hal-04784361**

**<https://hal.science/hal-04784361v1>**

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.



# Etude de l'influence de la micro-géométrie d'arête sur les chargements mécaniques et les contraintes résiduelles lors d'une opération de fraisage de finition du Ti-6Al-4V

Matthieu PAILLARD<sup>(a)(b)</sup>, Nils VOLDOIRE<sup>(a)</sup>, Frédéric ROSSI<sup>(a)</sup>,  
Gérard POULACHON<sup>(a)</sup>, Hélène ELIAS-BIREMBAUX<sup>(a)</sup>,  
Mathieu RITOU<sup>(c)</sup>, Nicolas MAURY<sup>(b)</sup>

*(a) Arts et Métiers, LaBoMaP, UBFC, 71250 Cluny, France*

*(b) Airbus Operations SAS, 31200 Toulouse, France*

*(c) Nantes Université, LS2N, 44000 Nantes, France*

Mail : [matthieu.paillard@ensam.eu](mailto:matthieu.paillard@ensam.eu)

**Résumé :** L'obtention d'une surface finie de haute qualité tout en minimisant les effets indésirables liés aux opérations d'usinage constitue un défi scientifique majeur dans la fabrication de composants aéronautiques. Pour surmonter cette difficulté, il est essentiel d'identifier les paramètres opérationnels ayant un impact significatif pour les corrélés avec l'intégrité de la surface obtenue. Cette étude vise à évaluer l'incidence de la micro-géométrie de l'outil de coupe sur les chargements mécaniques subis par la surface générée ainsi que la modification de ses propriétés. Des essais d'usure ont été réalisés en variant les rayons d'acuité d'arête de l'outil afin d'analyser l'influence de la micro-géométrie sur les chargements mécaniques et la cinétique d'usure. Cette approche initiale met en évidence l'impact significatif de la micro-géométrie sur les efforts générés lors de l'opération, mettant en lumière l'existence d'un rayon d'acuité d'arête optimal. Les résultats montrent une augmentation des efforts de labourage, attribuable à une augmentation du volume de matière labourée, tandis que l'usure a tendance à accroître la surface de frottement en dépouille. La corrélation de l'évolution des efforts en fonction de l'usure avec les contraintes résiduelles mesurées montre une forte influence du chargement thermique en surface et une prédominance du chargement mécanique en sub-surface.

**Mots clés :** Fraisage, Géométrie d'arête, Efforts, Labourage, Contraintes résiduelles

## 1 Introduction

Les procédés d'usinage revêtent une importance fondamentale dans la fabrication de composants à haute valeur ajoutée, en particulier dans le secteur de l'industrie aérospatiale. La littérature a abondamment démontré que ces procédés exercent une influence significative sur l'intégrité de surface du produit final. Intégrité de surface qui agit à son tour sur la durée de vie du composant. L'étude menée par Moussaoui et al. (Moussaoui et al., 2015) illustre l'influence des contraintes résiduelles et de la rugosité induites pendant l'usinage sur les propriétés en fatigue, en se concentrant notamment sur le fraisage de l'alliage de titane Ti-6Al-4V. Brinksmeier et al. (Brinksmeier et al., 2011), par le biais de l'introduction du Process Signature, ont proposé une méthodologie détaillant la chaîne causale de l'usinage, englobant les conditions opératoires, les chargements thermomécaniques, et l'intégrité de surface jusqu'aux propriétés fonctionnelles. Ainsi, dans l'optique d'une modélisation plus précise et d'une compréhension approfondie des phénomènes entraînant ces modifications, la présente étude représente les premières étapes d'une telle approche.

Selon l'étude et l'analyse de l'influence de la micro-géométrie d'arête sur les procédés d'usinage par Zhuang et al. (Zhuang et al., 2021), il est impératif de prendre en considération la forme des arêtes de coupe en tant qu'éléments clés pour la maîtrise du procédé. Ces paramètres influent sur l'écoulement de la matière et, par conséquent, ont une incidence sur le chargement thermomécanique et sur la durée de vie de l'outil. Dans leur étude, Lv et al. (Lv et al., 2020) se sont penchés sur l'influence du rayon d'acuité d'arête initial sur l'usure lors du fraisage de l'acier SUS-316L. Utilisant la méthodologie d'analyse de Wyen et al. (Wyen et al., 2010) pour isoler les efforts de labourage, les auteurs ont observé une augmentation de ces efforts avec l'augmentation du rayon d'acuité d'arête. Ils ont également constaté une influence de celui-ci sur l'évolution de l'usure, soulignant qu'un rayon d'acuité optimal prolonge la durée de vie de l'outil. Les études (Zetek et al., 2014) (Fulemová et al., 2015) font également état de l'influence du rayon d'acuité initial sur la durée de vie de l'outil mais ne s'intéressent pas à l'évolution des efforts et de l'intégrité de surface à mesure que l'outil s'use. Ventura et al. (Ventura et al., 2015) ont examiné différentes géométries d'arêtes assimilables à des arêtes usées, observant une augmentation des efforts pour une arête dont la longueur de contact en dépouille augmente.

Des observations similaires ont été faites par Chen et al. (Chen et al., 2004), qui ont également prédit, à travers une étude numérique, que l'usure en dépouille influence les contraintes résiduelles en coupe orthogonale de l'alliage de titane Ti-6Al-4V en les orientant vers des contraintes de traction. De plus, Hughes et al. (Hughes et al., 2006) ont déterminé que, pour une opération de tournage de l'alliage de titane Ti-6Al-4V, une augmentation de l'usure de l'outil induit une augmentation des contraintes résiduelles de compression. Denkena et al. (Denkena et al., 2012) montrent l'influence de différentes micro-géométries d'arête sur la durée de vie de l'outil, les efforts de coupe et les contraintes résiduelles dans le cas du rainurage de l'acier 42CrMo4. Ils concluent qu'à mesure que la taille de la zone de stagnation augmente, et implicitement le rayon d'acuité, le chargement thermomécanique généré augmente et les contraintes résiduelles tendent vers des contraintes de traction.

La littérature présente donc des divergences, illustrant l'utilité d'une approche causale pour prédire et comprendre les modifications de l'intégrité de surface. L'objectif de cette étude est d'améliorer la compréhension des chargements mécaniques externes influencés par une modification de la micro-géométrie d'arête lors des opérations de finition de titane Ti-6Al-4V et de réaliser une corrélation entre les niveaux d'usure et les contraintes

résiduelles mesurées. Ceci se fera dans un premier temps en déterminant un rayon d'acuité optimal minimisant l'usure, puis en corrélant les différents niveaux d'usure du rayon optimal avec des contraintes résiduelles estimées par diffraction des rayons-X.

## 2 Procédure expérimentale

Quatre essais d'usure de contournage en avalant ont été réalisés sur une fraiseuse 3 axes DMC65V, utilisant une fraise carbure monobloc Walter Prototyp à 5 dents. Pour éviter les variabilités induites par le faux-rond, quatre des dents de la fraise ont été retirées, laissant une seule dent opérationnelle. Sur une unique fraise, quatre portions ont été préparées avec des rayons d'acuité  $r_\beta$ , de 6, 15, 30 et 50  $\mu\text{m}$ . Ces portions sont illustrées dans la (Figure 1 (a)). Les rayons d'acuité  $r_\beta$  de 6 et 15  $\mu\text{m}$  ont été préparés par smuritropie. En raison du comportement asymptotique observé dans l'évolution des rayons au fil du temps, les rayons de 30 et 50  $\mu\text{m}$  ont été générés par brossage. Leurs qualifications ont été réalisées à l'aide d'un microscope numérique ALICONA InfiniteFocusSL.

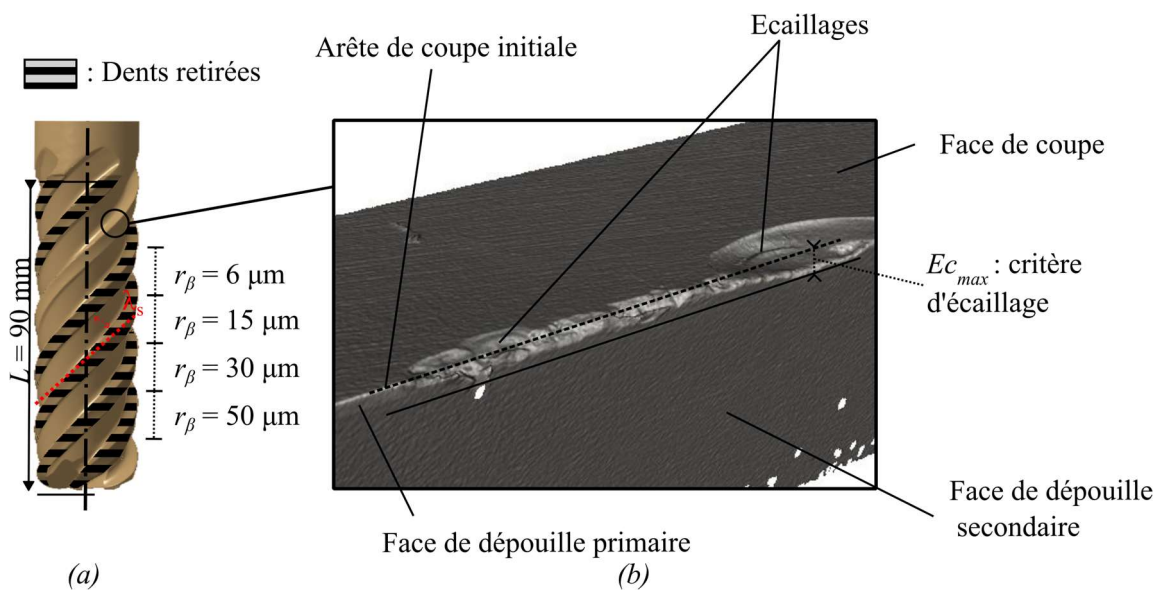


Figure 1 : (a) Fraise monobloc comportant les quatre rayons d'acuité  $r_\beta$   
(b) Illustration de l'arête écaillée et critère d'usure  $E_{c_{max}}$

Les quatre essais d'usure ont été réalisés selon les conditions de finition résumées dans le (Figure 2 (b)). Les efforts pendant l'opération de fraisage ont été monitorés à l'aide d'une platine Kistler 9170A, dont le montage est illustré à la (Figure 2 (a)).



$\gamma_n$	10 °	Opération	Contournage
$\alpha_n$	10 °	Mode d'usinage	Avalant
$L_{sn}$	65 $\mu\text{m}$	Matériau usiné	Ti-6Al-4V
$\lambda_s$	44 °	Matériau usinant	WC-Co
$r_\beta$	6 – 15 30 – 50 $\mu\text{m}$	Lubrification	Huile soluble par l'extérieur
$v_c$	160 m/min		
$f_z$	0.2 mm/dent/tr		
$a_p$	10 mm		
$a_e$	0.2 mm		
$D_{outil}$	25 mm		

Figure 2 : (a) Dispositif expérimental (b) Conditions opératoires

L'usure a été mesurée toutes les 75 passes à l'aide d'un microscope optique Keyence. La cinétique d'usure lors des essais n'étant pas stable et se caractérisant par du micro-écaillage, le motif d'usure choisi est la cote de l'écaillage maximal  $Ec_{max}$  mesuré dans  $P_s$  tel qu'illustré en (Figure 1 (b)). De cette façon, l'analyse des résultats sera faite en assimilant ce critère à de l'usure en dépouille et en étudiant principalement les phénomènes apparaissant en zone de cisaillement tertiaire.

### 3 Résultats et analyse

#### 3.1 Influence du rayon d'acuité initial sur l'évolution de l'usure

Les essais d'usure réalisés pour les 4 rayons d'acuité ont généré les courbes présentées à la (Figure 3). Comme suggéré par Xiaoliang et al. (Xiaoliang et al., 2020) et Deng et al. (Deng et al., 2008) pour de la coupe continue ainsi que Jawaid et al. (Jawaid et al., 2000) pour de la coupe discontinue, le micro-écaillage est un mode d'usure commun pour le couple outil/matière étudié. La forte affinité chimique du titane avec le carbure va mener à l'apparition d'adhésion et de micro-soudures entre l'outil et la pièce puis à leurs ruptures. Les essais n'ayant été réalisés qu'une seule fois (essais chronophages), et au vu du mode d'usure étudié, la répétabilité des résultats obtenus reste à relativisée. Elle sera considérée, ici, acceptable puisqu'il y a une certaine stabilité dans l'apparition du micro-écaillage. Les évolutions par palier s'expliquent par le fait que les micro-écaillages surviennent de manière aléatoire sur l'arête jusqu'à ce que l'usure abrasive les élimine, provoquant ensuite l'apparition d'un nouvel écaillage plus important et induisant une augmentation soudaine de la valeur du critère d'usure  $Ec_{max}$  la (Figure 3) témoignent de la cinétique décrite précédemment. Les résultats montrent que les rayons d'acuité d'arête  $r_\beta$  de 6 et 50  $\mu\text{m}$  ont les durées de vie les plus faibles, tandis que ceux de 15 et 30  $\mu\text{m}$  possèdent les plus élevées. Ces observations confirment les conclusions de Lv et al. (Lv 2020) concernant le fraisage de l'acier SUS-316L, soutenant ainsi l'existence d'un rayon d'acuité optimal situé entre 15 et 30  $\mu\text{m}$  pour le cas particulier de l'alliage de titane étudié.

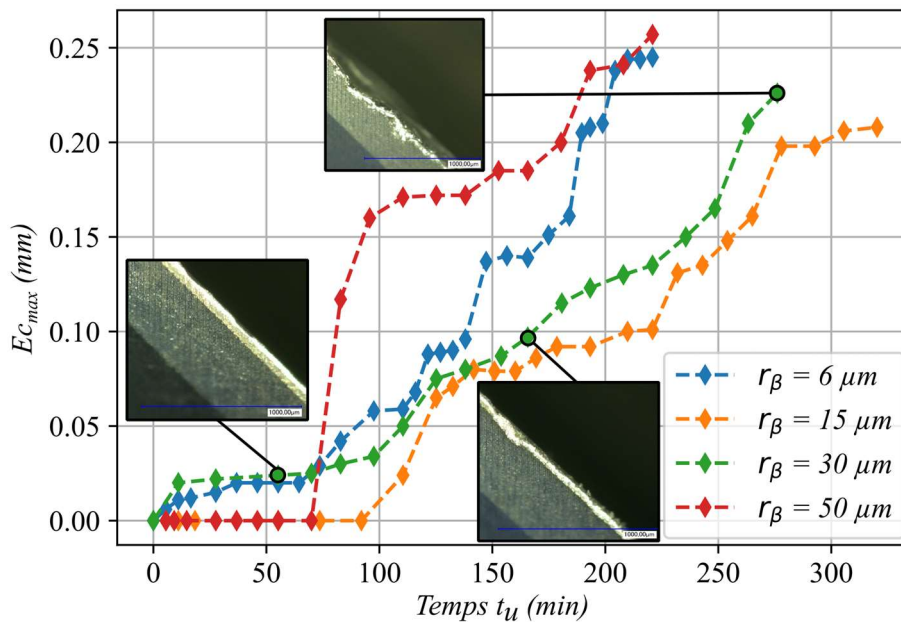


Figure 3 : Evolution de l'écaillage maximal  $Ec_{max}$  en fonction du temps d'usinage  $t_u$  en contournage de l'alliage de titane Ti-6Al-4V pour des rayons d'acuité  $r_\beta$  de 6, 15, 30 et 50  $\mu\text{m}$



### 3.2 Influence de la micro-géométrie sur les chargements externes

#### 3.2.1 Influence du rayon d'acuité $r_\beta$ sur les efforts monitorés

Le suivi des efforts pendant les essais d'usure pour un temps d'usinage  $t_u$  de 55 min, correspondant à la fin de la période de rodage de l'outil, est exposé à la (Figure 4) pour différentes valeurs du rayon d'acuité d'arête  $r_\beta$ . Les efforts recueillis au cours d'une passe sont moyennés et affichés sur une révolution complète de la fraise.

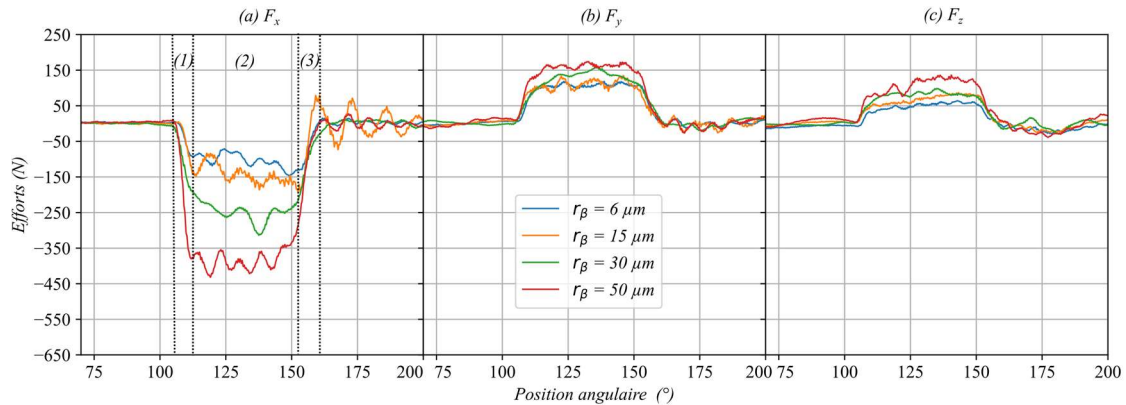
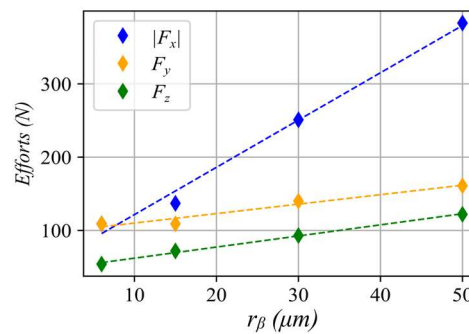


Figure 4 : Efforts  $F_x$  (a)  $F_y$  (b)  $F_z$  (c) monitorés et moyennés sur une révolution d'outil pour les différents rayons d'acuité  $r_\beta$  à un temps d'usinage  $t_u = 55$  min

Les profils d'efforts se décomposent en trois phases, comme le montre la (Figure 4). Les efforts augmentent durant la phase d'entrée de la dent en matière (1), atteignant un palier qui correspond à l'engagement total de la dent. Ensuite, la dent effectue une translation rectiligne dans le matériau (2) avant de se retirer (3). Les oscillations observées sur les courbes sont attribuables aux vibrations générées par la platine lors des entrées et des sorties de la dent en matière. Les efforts moyens mesurés pendant la phase (2), caractérisée lors de la phase d'engagement constante de la dent, sont présentés à la (Figure 5 (a)), tandis que leurs évolutions en fonction du rayon  $r_\beta$  sont illustrées à la (Figure 5 (b)). Ils augmentent de manière linéaire en fonction du rayon d'acuité d'arête, en particulier les efforts  $F_x$  qui connaissent une croissance de 251 %. Cette augmentation est attribuée au phénomène de labourage qui devient plus important à mesure que l'arête se rayonne, diminuant l'angle de coupe local. La faible variation de  $F_y$  et  $F_z$  est interprétée comme une conséquence de l'évolution de l'effort  $F_x$  normal à la surface, sous l'hypothèse que le labourage est caractérisé par un frottement de type Coulomb.

$r_\beta$ ( $\mu\text{m}$ )	6	15	30	50
$F_x$ (N)	-109	-137	-251	-383
$F_y$ (N)	109	109	140	161
$F_z$ (N)	54	72	93	122

(a)



(b)

Figure 5 : (a) Valeurs numériques (b) évolution des efforts monitorés moyens lors d'un passage de dent pour les différents rayons  $r_\beta$  à un temps d'usinage  $t_u = 55$  min

### 3.2.2 Influence du temps d'usinage $t_u$ sur les efforts monitorés

Le suivi des efforts pendant les essais d'usure, en fonction du temps d'usinage  $t_u$  et pour un rayon d'acuité  $r_\beta$  de  $30 \mu\text{m}$ , est illustré à la (Figure 6). Les efforts, moyennés sur une révolution d'outil, se décomposent selon trois phases distinctes, comme présenté dans la (Figure 4). Les efforts moyens mesurés pendant la phase (2) sont également exposés à la (Figure 7 (a)), tandis que leurs évolutions en fonction du temps d'usinage  $t_u$  sont représentées à la (Figure 7 (b)). Les trois phases correspondent respectivement à l'entrée de la dent en matière, un régime permanent en engagement d'outil puis la sortie de la dent.

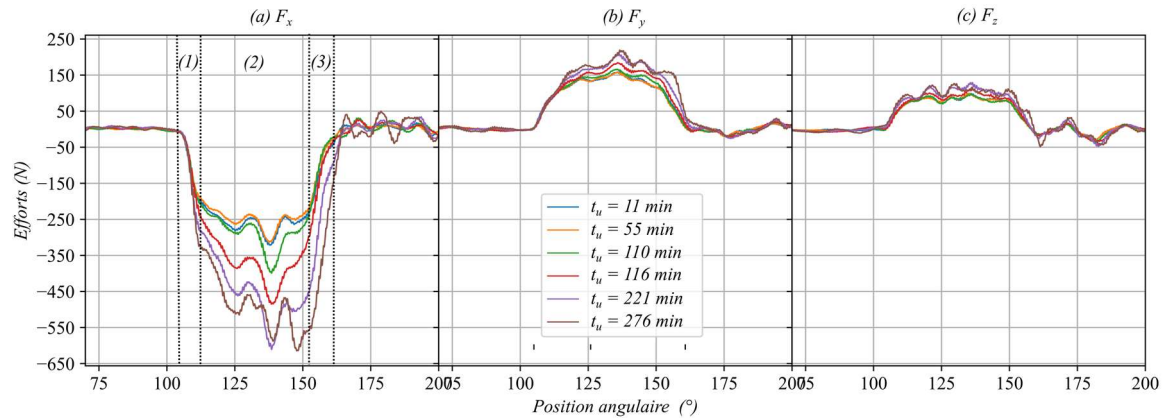
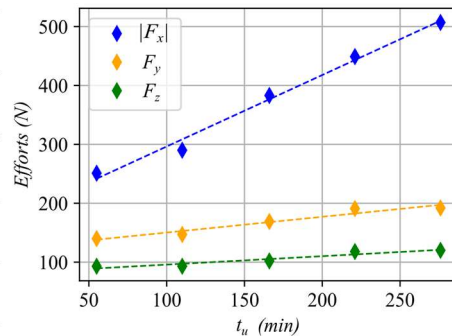


Figure 6 : Efforts  $F_x$  (a)  $F_y$  (b)  $F_z$  (c) monitorés et moyennés sur une révolution d'outil pour les différents temps d'usinage  $t_u$  et le rayon d'acuité d'arête  $r_\beta = 30 \mu\text{m}$

Ces résultats mettent en évidence une augmentation linéaire des efforts, en particulier pour la composante  $F_x$  normale à la surface finale. Cette prédominance accrue de l'effort  $F_x$  indique une intensification du phénomène de labourage. À mesure que le temps d'usinage progresse, le critère d'usure  $Ec_{max}$  évolue également, augmentant ainsi la taille de la zone de contact en dépouille. En conséquence, la surface sur laquelle le retour élastique de la matière génère un effort s'accroît, entraînant une augmentation générale des efforts.

$t_u$ (min)	55	110	166	221	276
$Ec_{max}$ (mm)	0.011	0.020	0.059	0.139	0.245
$F_x$ (N)	- 251	- 290	- 383	- 449	- 507
$F_y$ (N)	140	147	169	191	192
$F_z$ (N)	93	93	102	118	120

(a)



(b)

Figure 7 : (a) Valeurs numériques (b) Evolution des efforts monitorés moyens lors d'un passage de dent pour les différents temps d'usinage  $t_u$  et le rayon d'acuité d'arête  $r_\beta = 30 \mu\text{m}$

### 3.3 Influence de l'usure sur les contraintes résiduelles

Pour témoigner de l'importance de la micro-géométrie d'arête et rendre compte de l'influence de l'évolution de l'usure sur les contraintes résiduelles, des mesures de diffraction des rayons-X (DRX) ont été réalisées avec un diffractomètre Proto iXRD. Les contraintes sont calculées via la loi du  $\sin^2\psi$ , tel que spécifié par la norme NF EN 15305. Les différentes conditions expérimentales utilisées sont présentées en (Tableau 1).

Tableau 1 : Conditions expérimentales utilisées lors des mesures par DRX

Source	Cuivre $K\alpha(\text{Cu})=1.5406 \text{ \AA}$
Méthode de calcul	Loi des $\sin^2\psi$
Nombre d'angles $\psi$ balayés	13
Plans diffractants	{213} de la phase $\alpha$ hexagonale
Angle de Bragg $2\theta$	$140.6^\circ$
Taille de collimateur	3 mm

La (Figure 8) illustre l'évolution des contraintes résiduelles le long de la direction d'avance de l'outil pour le rayon d'acuité  $r_\beta = 30 \mu\text{m}$ . Ces mesures sont réalisées sur un point central moyennant plusieurs passages de dents. Par conséquent, les contraintes obtenues seront supposées identiques sur toute la longueur de l'éprouvette. Pour les mesures correspondant au temps d'usinage le plus court  $t_u = 55 \text{ min}$ , les éprouvettes présentent un niveau maximal de compression, attribuable à un chargement mécanique élevé lorsque la surface de contact est minimale. À  $t_u = 110 \text{ min}$  et à mesure que le temps d'usinage augmente, l'expansion de la surface de contact en dépouille entraîne une augmentation de la puissance dissipée par frottement et une élévation de la température en surface. Cette élévation de température tend à réduire les contraintes de compression, les orientant plutôt vers des contraintes de traction. C'est sur les 10 premiers microns sous la surface que ce relâchement est observé. Suivant cette tendance, les contraintes résiduelles de compression pour  $t_u = 166 \text{ min}$  et  $t_u = 221 \text{ min}$  augmentent, décalant le pic de compression en profondeur. Ceci indiquerait alors une augmentation du chargement mécanique et de la profondeur affectée mécaniquement.

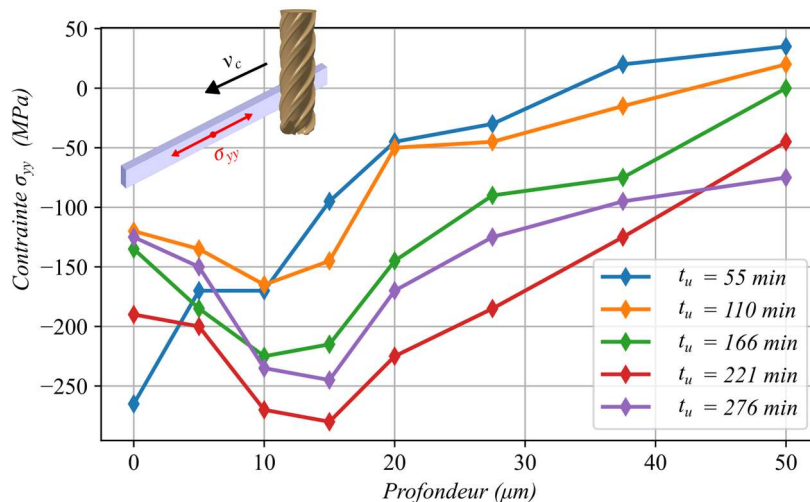


Figure 8 : Contraintes résiduelles dans la direction de l'avance, mesurées par DRX à différents temps d'usinage et  $r_\beta = 30 \mu\text{m}$



Ainsi qu'une augmentation du chargement thermique et de la profondeur thermiquement affectée. Pour ces valeurs de  $t_u$ , l'augmentation thermique est proportionnelle à la composante mécanique, car le niveau de compression en surface augmente. Enfin, pour le dernier temps,  $t_u = 276$  min, l'effondrement de l'arête conduit à une augmentation générale des efforts et à une diminution de la pression et des contraintes générées en pointe d'outil. Cependant, l'augmentation thermique est la plus significative et cohérente avec le niveau d'usure mesurée si on l'assimile à de l'usure en dépouille. À mesure que l'usure progresse, une augmentation des contraintes résiduelles de compression est observée, en accord avec les résultats de (Hughes et al., 2006), suggérant que cela est causé par l'augmentation des efforts. Néanmoins, une augmentation du relâchement des contraintes de compression en surface est également observée, suggérant l'apparition de contraintes de traction en surface pour des valeurs de  $t_u$  plus élevées, comme mentionné par (Chen et al., 2004). Ceci entraîne alors la translation du pic de contraintes de compression plus en profondeur sous la surface, tel que décrit par (Nespor et al., 2015). Les explications émises dans cette section pour décrire la génération de contraintes résiduelles ne sauraient être absolues. Elles nécessitent d'être considérées avec réserve puisque ces contraintes sont le produit de nombreux mécanismes et chargements non étudiés ici.

#### 4 Conclusion

Des essais d'usure en contournage ont été effectués sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V, en partant de différents rayons d'acuité initiaux. Cela a permis de mettre en évidence l'existence d'une plage de rayons d'acuités optimaux comprise entre 15 et 30  $\mu\text{m}$  maximisant la durée de vie de l'outil lors de l'usinage de cet alliage. La cinétique d'usure étudiée étant du micro-écaillage, la répétition des essais menés ici serait nécessaire pour valider les analyses. Une augmentation de l'usure et du rayon d'acuité  $r_\beta$  entraîne une augmentation des efforts, et en particulier des efforts normaux à la surface finale. L'évolution de la micro-géométrie a donc clairement une influence sur le phénomène de labourage. Cependant, cette influence diffère, car une augmentation du rayon d'acuité augmente le volume de matière labouré, tandis qu'une augmentation de l'usure augmente la surface de frottement en dépouille. Bien que l'augmentation des efforts dans le cas de l'usure soit plus faible, elle n'est pas négligeable. La durée de vie maximale serait ainsi obtenue pour un rayon d'acuité minimisant les efforts et maximisant la surface de contact. En effet, l'accroissement de la surface de contact génère un chargement thermique considérablement plus élevé.

Les contraintes résiduelles, évaluées à travers la diffraction des rayons-X, montrent un décalage et une augmentation du pic de compression en profondeur à mesure que l'outil s'use. Cette observation s'explique par l'augmentation simultanée du chargement thermique et mécanique. Toutefois, l'analyse de l'évolution des contraintes indique que le chargement prédominant demeure mécanique. La création d'un modèle numérique de prédiction des contraintes résiduelles dans le cadre de travaux futurs permettra d'approfondir la compréhension de la rivalité entre les effets thermiques et mécaniques

sur ces contraintes lors du processus d'usinage et permettra de valider les hypothèses faites sur la génération des contraintes observées dans cette étude.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier AIRBUS Operation SAS pour le financement de ces travaux, Nils Voldoire et Serge Borecki (AMValor) pour la réalisation des essais d'usure, et Raphaël Pesci (LEM3) pour les mesures DRX.

## Références

E. Brinksmeier, R. Gläbe, F. Klocke, D.A. Lucca (2011) *Process Signatures – an Alternative Approach to Predicting Functional Workpiece Properties*, *Procedia Engineering*, vol 19, pp. 44-52

L. Chen, T.I. El-Wardany, W.C. Harris, (2004) *Modelling the Effects of Flank Wear Land and Chip Formation on Residual Stresses*, *CIRP Annals*, vol 53, pp. 95-98

J. Deng, Y. Li, W. Song, (2008) *Diffusion wear in dry cutting of Ti-6Al-4V with WC/Co carbide tools*, *Wear*, vol 265, pp. 1776-1783

B. Denkena, J. Koehler, M Rehe (2012) *Influence of the honed cutting edge on tool wear and surface integrity in slot milling of 42CrMo4 steel*, *Procedia CIR*, vol 1, pp. 190-195

J. Fulemová, J. Řehoř (2015) *Influence of form factor of the cutting edge on tool life during finishing milling*, *Procedia Eng*, vol 100, pp. 682-688

J.I. Hughes, A.R.C Sharman, K. Ridgway (2006) *The Effect of Cutting Tool Material and Edge Geometry on Tool Life and Workpiece Surface Integrity*, *Journal of Engineering Manufacture*, vol 220, pp. 93-107

A. Jawaid, S. Sharif, S. Koksai, (2000) *Evaluation of wear mechanisms of coated carbide tools when face milling titanium alloy*, *Journal of Materials Processing Technology*, vol 99, pp. 266-274

D. Lv, Y. Wang, X. Yu (2020) *Effects of cutting edge radius on cutting force, tool wear, and life in milling of SUS-316L steel*. *Int J Adv Manuf Technol*, vol 111, pp. 2833-2844

K. Moussaoui, M. Mousseigne, J. Senatore et al. (2015) *The effect of roughness and residual stresses on fatigue life time of an alloy of titanium*. *Int J Adv Manuf Technol*, vol 78, pp. 557-563

D. Nesor, B. Denkena, T. Grove, V. Böß (2015) *Differences and similarities between the induced residual stresses after ball end milling and orthogonal cutting of Ti-6Al-4V*, *Journal of Materials Processing Technology*, vol 226, pp. 15-24

C.E.H. Ventura, J. Köhler, B. Denkena (2015) *Influence of cutting edge geometry on tool wear performance in interrupted hard turning*, *Journal of Manufacturing Processes*, vol 19, pp. 129-134

C.F. Wyen, K. Wegener (2010) *Influence of cutting edge radius on cutting forces in machining titanium*, *CIRP Annals*, vol 59, pp. 93-96

L. Xiaoliang, L. Zhanqiang, W. Bing, (2020) *Multi-pattern failure modes and wear mechanisms of WC-Co tools in dry turning Ti-6Al-4V*, *Ceramics International*, vol 46, pp. 24512-24525

M. Zetek, E. Lyana, V. Vojtěch (2014) *Increasing cutting tool life when machining Inconel 718*, *Procedia Eng*, vol 69, pp. 1115-1124

K. Zhuang, C. Fu, J. Weng et al. (2021) *Cutting edge microgeometries in metal cutting: a review*. *Int J Adv Manuf Technol*, vol 116, pp. 2045-2092