



HAL
open science

Effet de l'assistance cryogénique sur l'usure des outils et l'intégrité de surface de pièces en Ti6Al4V

Achraf Fersi, Yessine Ayed, Bruno Lavis, Guénaél Germain

► To cite this version:

Achraf Fersi, Yessine Ayed, Bruno Lavis, Guénaél Germain. Effet de l'assistance cryogénique sur l'usure des outils et l'intégrité de surface de pièces en Ti6Al4V. Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, GRENOBLE, France. hal-04784411

HAL Id: hal-04784411

<https://hal.science/hal-04784411v1>

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.



Effet de l'assistance cryogénique sur l'usure et la durée de vie des outils

Achraf FERSI^(a), Yessine AYED^(b), Bruno LAVISSE^(c), Guénaël GERMAIN^(d)

Arts et Métiers, LAMPA, EA1427, Angers

Mail : achraf.fersi@ensam.eu, yessine.ayed@ensam.eu, bruno.lavisse@ensam.eu,
guenael.germain@ensam.eu

Résumé :

L'usinage des alliages de titane est accompagné par un dégagement de chaleur important entraînant l'accélération de l'usure de l'outil. Outre son efficacité limitée, le refroidissement de la zone de coupe à l'aide d'un fluide de coupe a un impact environnemental et sanitaire néfaste. Face à ces problématiques, l'assistance cryogénique et la MQL peuvent présenter des solutions intéressantes.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet du mode de lubrification sur la durée de vie des outils de coupe et sur les mécanismes d'usure. Les résultats des premiers essais montrent que l'utilisation de l'assistance cryogénique (LCO₂) et de la MQL permettent de multiplier la durée de vie de l'outil par 3 et 2.5, respectivement, par rapport à l'usinage sous émulsion. En effet, les faibles températures générées lors de l'usinage cryogénique semblent ralentir l'évolution des mécanismes d'usure et réduire la dégradation, par écaillage, de l'outil de coupe. De même, la lubrification avec MQL (Minimum Quantity Lubrication) dans des zones profondes aux interfaces outil/matière réduit le frottement, ce qui entraîne une augmentation de la durée de vie de l'outil.

Ces résultats préliminaires démontrent que le mode de lubrification a un impact significatif sur la durée de vie des outils et sur les mécanismes d'usure. L'utilisation de la cryogénie est une alternative prometteuse pour améliorer l'efficacité du processus d'usinage.

Mots clés : Fraisage, Cryogénie, Usure, Durée de vie, Titane

1 Introduction

Les alliages de titane se caractérisent par d'excellentes propriétés mécaniques qu'ils conservent à haute température, par une grande résistance à la corrosion, par une bonne biocompatibilité, et par un ratio résistance mécanique/densité très intéressant. Ces atouts favorisent, dès lors, l'utilisation des alliages de titane dans plusieurs secteurs industriels tels que l'aéronautique, l'automobile, les industries pétrochimiques et médicales (ARAB,2019). Néanmoins, ces alliages sont réputés par leur faible usinabilité qui se manifeste notamment par une dégradation rapide de la durée de vie des outils coupants. En effet, en raison de la faible conductivité thermique du titane et de ses alliages, la chaleur générée au cours de la coupe reste localisée dans la zone de coupe. S'y ajoute une haute réactivité chimique avec la plupart des matériaux coupants. Ces facteurs réunis engendrent l'accélération des mécanismes d'usure activés à haute température (HOYNE,2015).

Pour pallier ces difficultés, il est nécessaire de baisser les niveaux de température dans les zones de coupe afin de ralentir l'évolution de l'usure et d'augmenter la durée de vie de l'outil. À cette fin, la lubrification conventionnelle ou haute pression est mise en œuvre. Toutefois, l'usage des fluides de coupe a un impact environnemental (i.e. pollution, stockage et traitement des huiles usagées) et sanitaire (e.g. problèmes respiratoires, allergies, etc.).

Dans ce contexte, l'usinage avec assistance cryogénique ou avec MQL représentent des alternatives intéressantes (ROSS, 2022).

L'objectif de l'assistance cryogénique vise à baisser la température dans la zone de coupe en utilisant des fluides cryogéniques tels que l'azote liquide (LN₂), le dioxyde de carbone liquide (LCO₂) ou le CO₂ supercritique (ScCO₂). Cette méthode permet d'évacuer la chaleur localisée et de limiter ou d'éliminer l'utilisation des fluides de coupe nocifs pour les opérateurs et l'environnement. Les résultats des études concernant l'impact de l'utilisation de l'assistance cryogénique (LCO₂/LN₂) lors de l'usinage de l'alliage Ti-6Al-4V prouvent son efficacité comme technique de refroidissement. En effet, elle permet de prolonger la durée de vie des outils de coupe par rapport à l'usinage à sec ou avec lubrification conventionnelle. Ceci est confirmé par plusieurs travaux tels que (AGRAWAL, 2021), (JAMIL, 2021-a) et (JAMIL, 2021-b).

L'utilisation de la micro-lubrification MQL comme technique d'assistance pendant le processus d'usinage peut également être considérée comme un choix efficace par rapport à la lubrification conventionnelle. La MQL consiste à introduire un mélange d'huile de coupe à faible quantité avec l'air comprimé dans la zone de coupe sous forme de spray en aérosol. Les études convergent vers la conclusion que ce mode de lubrification permet de réduire l'usure des outils et d'augmenter leur durée de vie (SHARMA,2015), (GUPTA,2019).

L'objectif recherché à travers cette étude est d'évaluer l'effet de l'assistance cryogénique (LCO₂) et la MQL sur la durée de vie des outils de coupe par rapport à la lubrification conventionnelle, lors du fraisage du Ti-6Al-4V.

2 Assistance cryogénique en usinage

Le principe de l'assistance cryogénique consiste à projeter un fluide cryogénique dans la zone de coupe afin de la refroidir. En effet, la transformation du fluide de l'état liquide à l'état gazeux est une réaction endothermique qui génère du froid. L'azote liquide (LN2) et le dioxyde de carbone (CO2) sont les deux fluides cryogéniques les plus utilisés dans plusieurs procédés d'usinage tels que le perçage, le fraisage et le tournage (GERMAIN, 2016).

2.1 Dioxyde de carbone

Généralement, le dioxyde de carbone (CO2) est stocké à l'état liquide dans des réservoirs sous une pression de 57 bar à une température ambiante. L'apport du CO2 lors de processus d'usinage vers la zone de coupe est assuré à travers des buses de faible diamètre. Le diagramme de phase pour le dioxyde de carbone présenté par la figure 1 montre que la chute de pression du fluide à la sortie de la buse vers l'atmosphère (pression atmosphérique 1,013 bar) engendre sa transformation de l'état liquide en un mélange de 40% solide et 60 % gazeux à une température de -78 °C (MACHAI, 2016), ce phénomène est appelé l'effet Joule-Thomson.

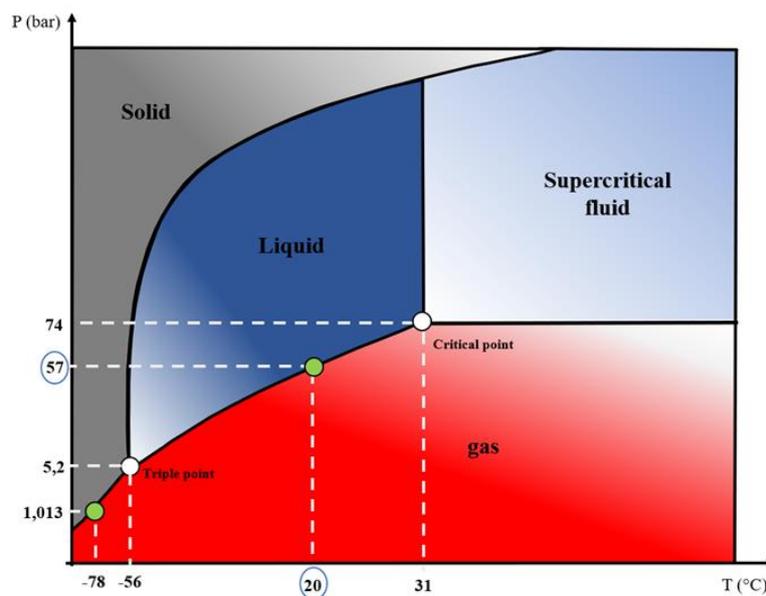


Figure 1: Diagramme de phases pour le CO₂ (Stoll, 2014)

3 Démarche expérimentale

Les essais de fraisage ont été réalisés sur un centre d'usinage SOMAB DIAM 1270 ($N_{\max} = 10000$ tr/min ; $P_{\max} = 15,5$ kW) à l'aide d'une fraise Mitsubishi de référence ARP5PR2503SA25M ($d=25$ mm et $Z=3$). Elle comporte des canaux internes assurant l'arrosage par le centre. Les plaquettes sélectionnées, de référence RPHT1040M0E4-M, présentent un substrat en carbure et un revêtement PVD qui consiste en une superposition de multicouche (Al-Ti-Cr-N). La figure 2 montre le dispositif expérimental.



Outil de coupe



Centre d'usinage

Figure 2: Machine et outil de coupe

L'essai de fraisage s'arrête lorsque l'usure en dépouille maximale (VB_{max}) atteint une valeur de $300 \mu\text{m}$. La progression de l'usure est mesurée régulièrement à l'aide d'une loupe binoculaire. Les paramètres de coupe sont indiqués dans le tableau 1. La stratégie d'usinage utilisée est le fraisage en spirale avec une entrée progressive dans la matière pour éviter les chocs sur les plaquettes, comme indiqué dans la Figure 3.

Tableau 1: Paramètres de coupe

Paramètre	Valeur
V_c (m/min)	150
f_z (mm/dent/tr)	0,15
N (tr/min)	1910
Z	1
a_e (mm)	12,5
a_p (mm)	1

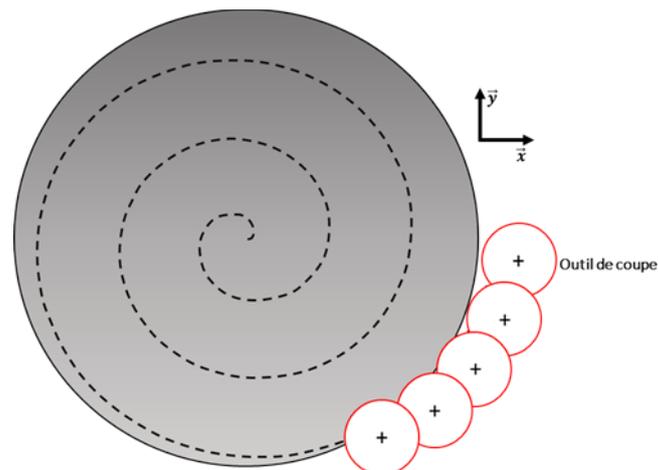


Figure 3: Stratégie d'usinage

La pièce à usiner est un cylindre en Ti-6Al-4V de diamètre 90 mm et d'une longueur de 150 mm. Le Ti-6Al-4V est un alliage de titane ($\alpha + \beta$) qui présente une microstructure duplex, caractérisée par des grains alpha (α) primaires ayant une structure hexagonale

compacte (hcp), entourés de grains bêta (β) avec une structure cubique centrée (bcc) (Cf. figure 4).

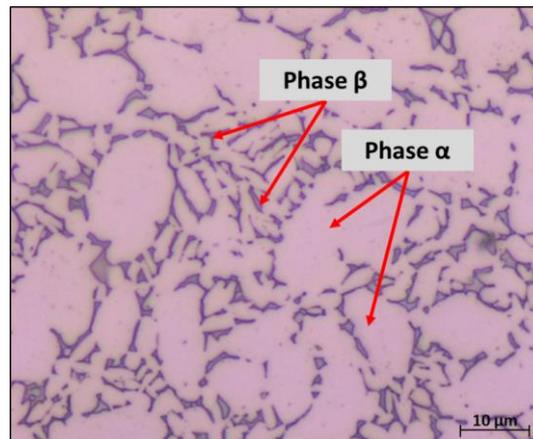


Figure 4: Microstructure du Ti-6Al-4V de l'étude

Pendant les essais de fraisage, trois techniques de refroidissement ont été testées ; la lubrification conventionnelle (émulsion), la MQL (aérosol master lubricant c-ti-1) et l'assistance cryogénique en utilisant le dioxyde de carbone liquide (LCO₂). En ce qui concerne la lubrification conventionnelle, elle est assurée par une buse externe qui utilise l'huile ECOCOOL CS+ (6% du mélange). Quant au refroidissement cryogénique et la MQL, les fluides sont acheminés à travers le centre broche et sont délivrés par les canaux internes de l'outil jusqu'à la zone de coupe. Le tableau 2 présente les paramètres liés aux fluides de coupe.

Tableau 2: Paramètres d'assistance

Type d'assistance	Pression (bar)		Débit (Kg/h)	D_{buse} (mm)
CO ₂	60		9,5	3
MQL	Air	2.6	25mL/h	3
	Huile	2.4		
Lubrification externe	20		-	5

4 Résultats

4.1 Durée de vie

La figure 5 présente l'évolution de l'usure (VB_{max}) en fonction du temps. On peut ainsi remarquer que l'usinage avec assistance cryogénique permet d'atteindre une durée de vie de 42,5 min. Avec la lubrification conventionnelle, l'usure en dépouille atteint sa valeur maximale (0,3 mm) après seulement 15 minutes d'usinage.

L'utilisation de la MQL permet d'usiner pendant une période de 35 min avant que la valeur de l'usure dépasse 0.3mm.

Dans ces conditions, la durée de vie de l'outil avec MQL a été multipliée par 2,5 par rapport à l'usinage sous émulsion. En effet, la pulvérisation du fluide sous pression permet d'atteindre des zones profondes aux interfaces pièce/outil/copeau en formant un film lubrifiant qui réduit le frottement sur les surfaces de contact. Cette réduction de frottement entraîne une baisse de température dans les zones de coupe secondaire et tertiaire. La MQL a efficacement lubrifié ces points de contact, ce qui se traduit par une augmentation de la durée de vie de l'outil (GUPTA,2019), (JAMIL, 2021-a).

L'assistance cryogénique permet de multiplier la durée de vie de l'outil d'environ 3 fois par rapport à l'usinage conventionnel. Cette différence pourrait être expliquée par l'efficacité du refroidissement cryogénique, qui se traduit par une baisse de la température de coupe et ainsi par le ralentissement de certains mécanismes d'usure (SHOKRANI,2019).

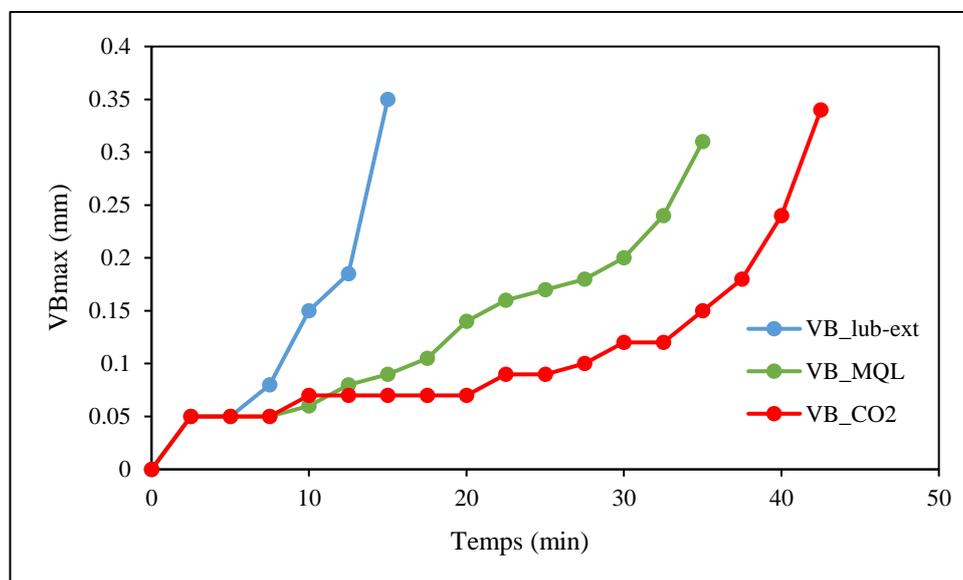


Figure 5 : Courbe d'usure (VB_{max}) en fonction de temps

4.2 Mécanismes d'usure

L'analyse des mécanismes d'usure s'est essentiellement basée sur des observations réalisées à l'aide du microscope électronique à balayage.

Dans ce cadre, la figure 6 montre la face de coupe de l'outil ayant usiné pendant 42,5 min sous LCO2. On peut alors facilement identifier des dépôts de matière et de microcopeaux au niveau de l'arête de coupe. De microfissures se propageant perpendiculairement à cette arête de coupe sont aussi clairement observables.

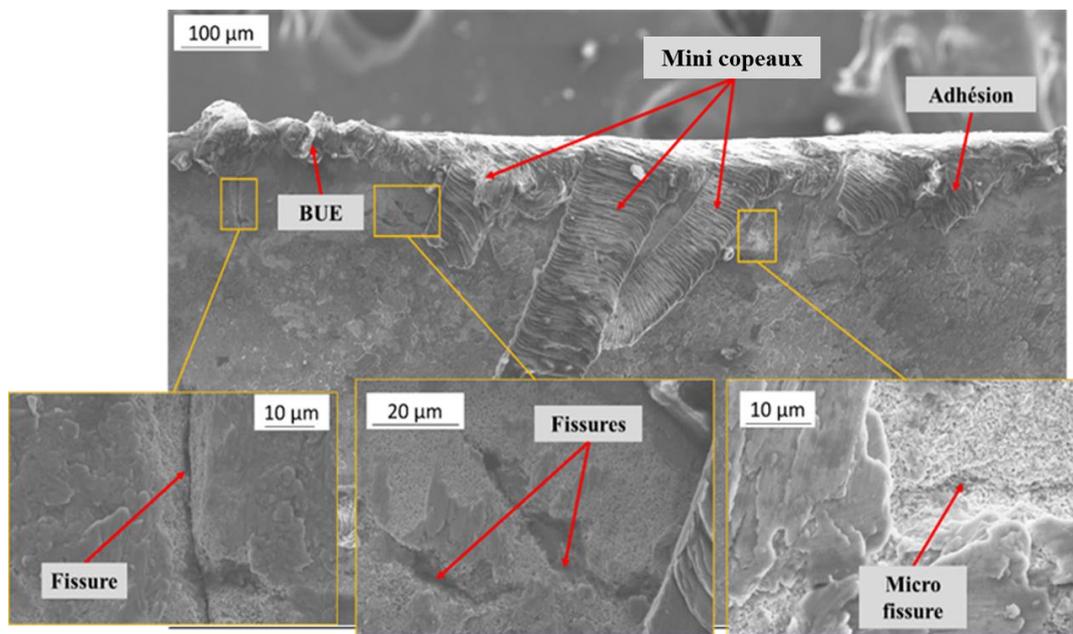


Figure 6: Face de coupe ; après 42.5 minutes d'usinage en CO2

La figure 7 montre la face de coupe de l'outil après usinage sous émulsion pendant 15 minutes. Outre le phénomène d'adhésion, elle montre un écaillage assez prononcé. Des microfissures sont également observées.

Ces résultats sont similaires aux observations de (SADIK, 2016) qui a expliqué que les fissures sont apparues suite aux chargements thermomécaniques cycliques. En effet, les entrées /sorties de l'arête de coupe dans la matière pendant le fraisage exposent cette dernière à des chargements thermomécaniques importants.

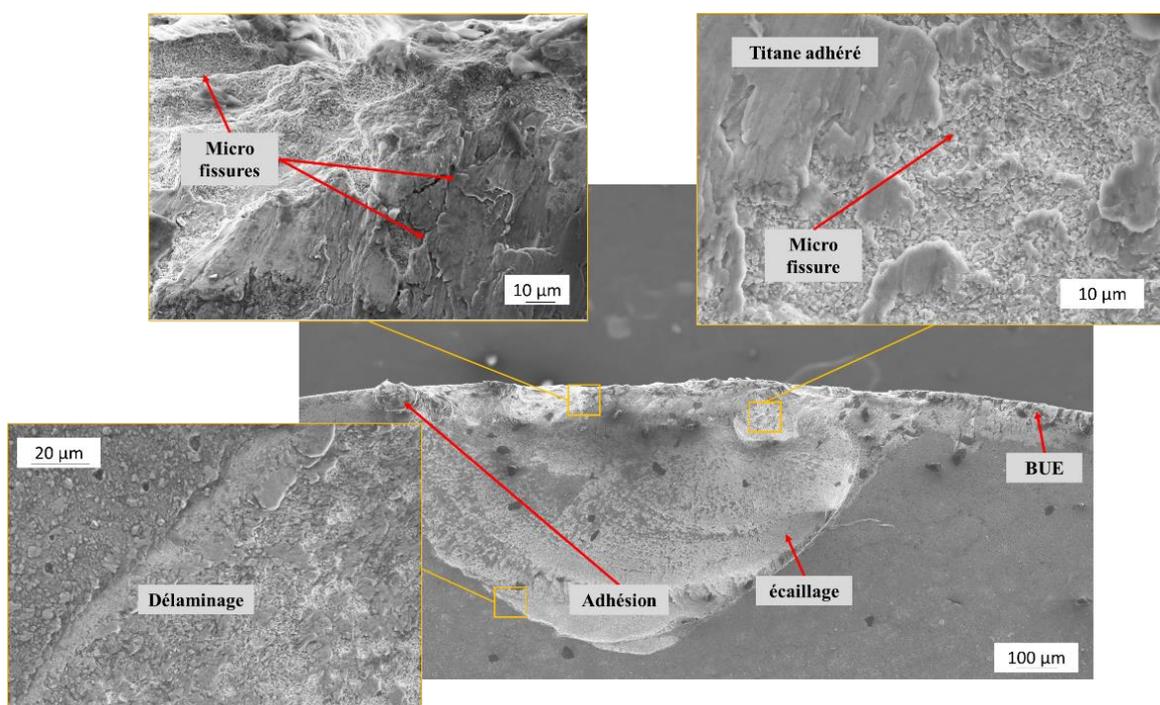


Figure 7: Face de coupe ; après 15 minutes d'usinage sous émulsion

La figure 8 montre la face de coupe de l'outil après usinage utilisant la MQL pendant 35 minutes. Les observations révèlent la présence d'adhésion de titane sur l'arête de coupe,

ainsi qu'un phénomène d'écaillage prononcé et un délaminage sur des bords des zones écaillées. (JAMIL, 2021-a) a montré que l'usure de l'outil de coupe sous MQL peut être justifiée par la formation répétitive d'arête rapportée (BUE). L'accumulation continue de matière sur l'arête de coupe, combinée à une pression extrême de contact, provoque le détachement de l'arête rapportée, tout en entraînant simultanément l'enlèvement d'une partie de la face de coupe.

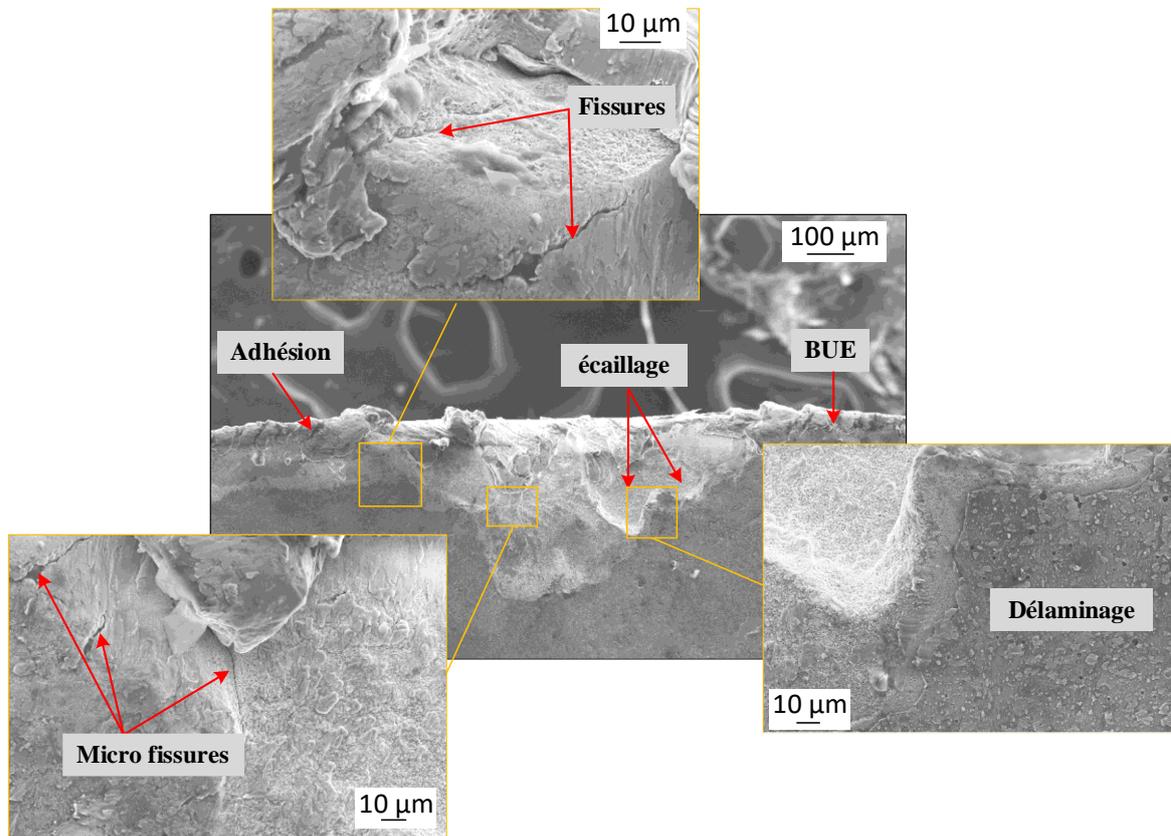


Figure 8: Face de coupe ; après 35 minutes d'usinage sous MQL

5 Conclusion

Les résultats obtenus de ce travail montrent que l'assistance sous LCO₂ est une technique efficace pour refroidir la zone de coupe lors d'usinage des alliages de titane.

Les essais de fraisage réalisés sur l'alliage Ti-6Al-4V ont mis en évidence l'impact du LCO₂ sur la durée de vie et l'usure de l'outil. L'utilisation de l'assistance cryogénique comme alternative à la lubrification conventionnelle limite l'usure par adhésion et élimine l'écaillage. Ceci s'est traduit par une multiplication d'environ 3 fois de la durée de vie de l'outil. Cette étude sera enrichie par des analyses des contraintes résiduelles post-usinage afin d'évaluer l'effet des conditions de lubrification sur l'intégrité de surface.

Références

(AGRAWAL, 2021) : AGRAWAL, Chetan, WADHWA, Jwalant, PITRODA, Anjali, et al. *Comprehensive analysis of tool wear, tool life, surface roughness, costing and carbon emissions in turning Ti-6Al-4V titanium alloy: Cryogenic versus wet machining. Tribology International*, 2021, vol. 153, p. 106597.

- (ARAB,2019) : ARAB, Ali, CHEN, Pengwan, et GUO, Yansong. *Effects of microstructure on the dynamic properties of TA15 titanium alloy. Mechanics of Materials*, 2019, vol. 137, p. 103121.
- (GERMAIN, 2016) : G. GERMAINI, A. MOREL, L. LAMBERT ; *assistance cryogénique en usinage, techniques de l'ingénieur _2016*
- (HOYNE,2015): HOYNE, Alexander C., NATH, Chandra, et KAPOOR, Shiv G. *On cutting temperature measurement during titanium machining with an atomization-based cutting fluid spray system. Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2015, vol. 137, no 2, p. 024502.
- (JAMIL,2021-a): JAMIL, Muhammad, ZHAO, Wei, HE, Ning, et al. *Sustainable milling of Ti-6Al-4V: A trade-off between energy efficiency, carbon emissions and machining characteristics under MQL and cryogenic environment. Journal of cleaner production*, 2021, vol. 281, p. 125374.
- (JAMIL,2021-b): JAMIL, Muhammad, HE, Ning, ZHAO, Wei, et al. *Heat transfer efficiency of cryogenic-LN2 and CO2-snow and their application in the turning of Ti-6AL-4V. International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 166, p. 120716.
- (MACHAI, 2016): MACHAI, Christian et BIERMANN, Dirk. *Machining of β -titanium-alloy Ti-10V-2Fe-3Al under cryogenic conditions: Cooling with carbon dioxide snow. Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211, no 6, p. 1175-1183.
- (ROSS,2022): ROSS, Nimel Sworna, SHEEBA, Paul T., JEBARAJ, M., et al. *Milling performance assessment of Ti-6Al-4V under CO2 cooling utilizing coated AlCrN/TiAlN insert. Materials and Manufacturing Processes*, 2022, vol. 37, no 3, p. 327-341.
- (Stoll, 2014): A. Stoll, K. Busch, C. Hochmuth, and B. Pause, "Modern cooling strategies for machining of high-temperature materials," in *3rd ICMC, Hybrid Processes*, 2014, pp. 299–315.
- (SADIK, 2017):SADIK, M. Ibrahim et ISAKSON, Simon. *The role of PVD coating and coolant nature in wear development and tool performance in cryogenic and wet milling of Ti-6Al-4V. Wear*, 2017, vol. 386, p. 204-210.
- (SHOKRANI,2019): SHOKRANI, Alborz, AL-SAMARRAI, Ihsan, et NEWMAN, Stephen T. *Hybrid cryogenic MQL for improving tool life in machining of Ti-6Al-4V titanium alloy. Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 43, p. 229-243.
- (GUPTA,2019) : GUPTA, Munish Kumar, MIA, Mozammel, SINGH, GurRaj, et al. *Hybrid cooling-lubrication strategies to improve surface topography and tool wear in sustainable turning of Al 7075-T6 alloy. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 101, p. 55-69.
- (SHARMA,2015): SHARMA, Vishal S., SINGH, GurRaj, et SØRBY, Knut. *A review on minimum quantity lubrication for machining processes. Materials and manufacturing processes*, 2015, vol. 30, no 8, p. 935-953.