



# Etude expérimentale de l'usinage du Ti6Al4V sous assistance CO<sub>2</sub> supercritique

**Koffi S. KOULEKPA<sup>(a)</sup>, Hélène ELIAS-BIREMBAUX<sup>(a)</sup>, Frédéric ROSSI<sup>(a)</sup>,  
Gérard POULACHON<sup>(a)</sup>**

*(a) Arts et Metiers Institute of Technology, LaBoMaP, Université Bourgogne Franche-Comté, HESAM Université, F-71250 Cluny, France*

*Mail : [koffi.koulekpa@ensam.eu](mailto:koffi.koulekpa@ensam.eu)*

**Résumé :** Le CO<sub>2</sub> supercritique (scCO<sub>2</sub>) est une nouvelle assistance émergente dans l'usinage de matériaux difficiles à usiner. Grâce à sa propriété de « supersolvant », le scCO<sub>2</sub> combine lubrification et refroidissement, s'imposant ainsi comme la nouvelle solution en assistance de l'usinage. Ces travaux présentent les performances comparées du scCO<sub>2</sub>, scCO<sub>2</sub> + MQL et émulsion en fraisage, pour l'évaluation de leurs impacts sur l'usure de l'outil et l'évolution des forces de coupe.

**Mots clés :** Usinage vert, CO<sub>2</sub> supercritique, MQL, Usure, Ti6Al4V

## 1 Introduction

L'utilisation des huiles de coupe, surtout dans le cas des matériaux difficiles à usiner, a pour objectif d'améliorer les durées de vie d'outil en évacuant la chaleur de la zone de coupe (refroidissement), en diminuant le frottement (lubrification) et en permettant une meilleure évacuation des copeaux. Mais les avantages qu'elles procurent entraînent également divers coûts et désagréments. En effet, d'un point de vue économique, les huiles de coupe représentent entre 7 et 17% du coût d'une opération (Klocke et al., 1997; Khanna et al., 2021) et par leurs compositions chimiques, ont des impacts sanitaires et environnementaux négatifs (Shah et al., 2021). D'autres méthodes dites plus « vertes » ont essayé de réduire ou d'éliminer l'utilisation de ces huiles de coupe en usinage.

- L'usinage à sec et les techniques MQL, entraînent souvent une accumulation de chaleur dans la zone coupe, due à un faible refroidissement, ce qui conduit à une usure rapide de l'outil (Tai et al., 2014).
- L'utilisation de gaz cryogéniques, typiquement l'azote liquide (LN<sub>2</sub>), permet un refroidissement rapide avec des températures en dessous de -150°C (Jawahir et al., 2016). Ces assistances, même si elles ont permis de remplacer les huiles de coupe, font face à d'autres verrous techniques comme la nécessité d'isoler les canaux d'acheminement pour un refroidissement efficace dans le cas du LN<sub>2</sub>.

C'est dans cette dynamique d'optimisation qu'est apparue l'utilisation du CO<sub>2</sub> supercritique (scCO<sub>2</sub>), comme nouvelle assistance à l'usinage.

## 2 Etat de l'art

Le CO<sub>2</sub> supercritique est l'état dans lequel se trouve le dioxyde de carbone au-dessus de son point critique ( $P = 73.8$  bars et  $T = 31^\circ\text{C}$ ), comme le montre la figure 1. Dans cet état, le CO<sub>2</sub> a une densité proche de celle de sa phase liquide, une viscosité proche de celle du gaz et une diffusivité à mi-chemin entre les deux (Perrut, 1999). (Clarens et al., 2006) furent les premiers à comparer le scCO<sub>2</sub> à d'autres fluides de coupe, pour des opérations de taraudage sur des blocs en acier AISI 1018. Le froid généré par le changement de phase et la chute de pression ont permis de refroidir significativement l'outil ; mais l'aspect novateur fut l'association du scCO<sub>2</sub>, à l'huile (de soja), qui a entraîné une nette amélioration de la durée de vie de l'outil. En effet, le scCO<sub>2</sub> étant connu comme un supersolvant « vert » (Hyatt, 2002), il est possible d'y dissoudre de l'huile pour l'amener jusqu'à la pointe de l'outil, permettant ainsi de combiner le refroidissement et la lubrification. La majorité des études, réalisées en fraisage établissent la hiérarchie, scCO<sub>2</sub> + MQL > scCO<sub>2</sub> > Emulsion, en comparant l'effet bénéfique sur les forces de coupe, l'usure de l'outil, l'état de surface de la pièce, ou encore les températures dans la zone de coupe. D'autres travaux ont confirmé les performances de cette nouvelle assistance pour d'autres matériaux tels que le Ti6Al4V (Wika et al., 2019), l'Inconel 750 (Stephenson et al., 2014a) ou encore les aciers traités thermiquement (Mulyana, 2017). (Yu et al., 2022; Zhang et al., 2021; Zou et al., 2021; Dang et al., 2021; Yuan et al., 2018) injectèrent dans le CO<sub>2</sub> supercritique, outre l'huile, des gouttelettes d'eau (scCO<sub>2</sub> + WMQL), ce qui parut plus refroidissant que l'injection d'huile seulement, pour certaines conditions étudiées. (Arafat et al., 2021) fut le seul à comparer le scCO<sub>2</sub> + MQL aux huiles de coupe en rectification. Les forces les plus faibles furent obtenues pour le scCO<sub>2</sub> + MQL, mais le meilleur état de surface avec l'émulsion. (Stephenson et al., 2014b; Rahim et al., 2018) ont confirmé l'apport bénéfique du scCO<sub>2</sub> + MQL sur l'évolution des forces de coupe et des températures dans le cas du tournage. Suite à tous ces résultats, il est donc important d'explorer cette nouvelle assistance, ses capacités et ses limites dans diverses configurations, pour une amélioration de l'assistance à l'usinage.

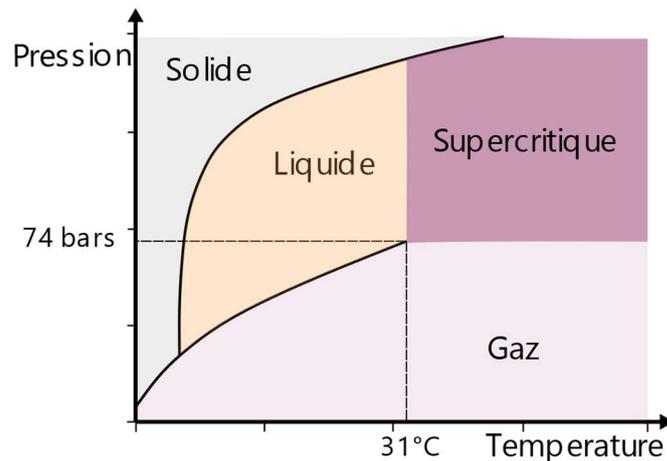


Figure 1 : Diagramme Pression - Température du CO<sub>2</sub> adapté de Arafat et al., 2021

### 3 Dispositif expérimental et conditions d'essais

L'objectif de ces essais réalisés en fraisage est de comparer l'usure de l'outil et l'évolution des forces de coupe pour le scCO<sub>2</sub>, scCO<sub>2</sub> + MQL et émulsion. L'outillage, les conditions de travail et le matériel utilisé, sont décrits dans les sections suivantes.

#### 3.1 Matériau usiné

Un bloc de Ti6Al4V forgé, de 204\*204\*30 mm<sup>3</sup> a été utilisé pour les essais. La composition et les propriétés du matériau sont données dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 1 : Composition chimique du matériau obtenue par analyse

Elément	C	V	N	Fe	Ti	Al	H	O
Teneur massique (%)	0,014	4,25	0,008	0,14	Compl.	6,53	0,002	0,166

Tableau 2 : Propriétés mécaniques du matériau

R <sub>m</sub> (MPa)	R <sub>p0.2</sub> (MPa)	A%	Z%	Dureté HRC
937	873	21,5	39	33

#### 3.2 Production de scCO<sub>2</sub>

Une station de production instrumentée, dénommée « VENUS – VErs un Nouvel USinage », a été réalisée pour la production de scCO<sub>2</sub> avec micro-injection d'huile. La figure 2 montre le schéma du dispositif pour l'usinage avec scCO<sub>2</sub> et scCO<sub>2</sub> + MQL. Le mélange liquide-gaz de CO<sub>2</sub> récupéré dans les bouteilles est envoyé par l'entrée (a) dans le sous-refroidisseur (c) de la station pour obtenir un état complètement liquide, avant la compression du fluide par la pompe (d), jusqu'à la pression spécifiée, sur l'écran de contrôle (b). Les cartouches chauffantes (e) permettent de porter la température à la

consigne fixée, pour obtenir la transition supercritique. Le système permet d'envoyer des micro-injections d'huile (MQL) contrôlées en durée et en fréquence (f). L'électrovanne de sortie pilotée par l'automate (h) depuis l'écran (b), permet d'envoyer le  $scCO_2$  ou le mélange  $scCO_2$  + MQL en pointe d'outil, à travers la buse positionnée par des bras articulés.

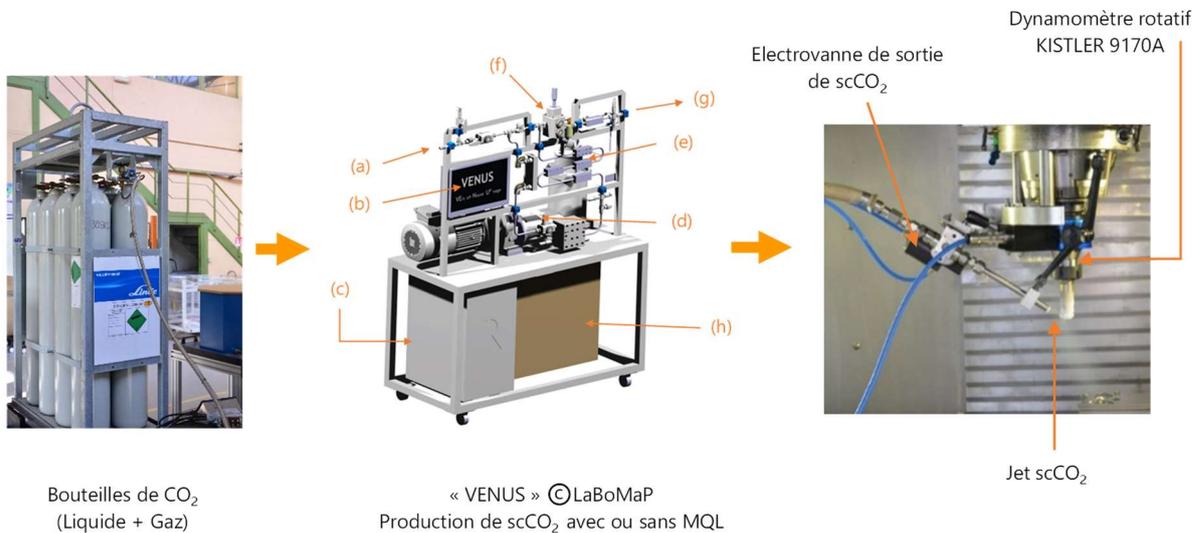


Figure 2 : Représentation de l'acheminement du  $scCO_2$

### 3.3 Conditions de coupe et paramètres de réglage de l'assistance

Les essais de surfacage ont été réalisés sur une machine SIEMENS 840D, pour les trois assistances :  $scCO_2$ ,  $scCO_2$  + MQL et émulsion. Deux types d'entrée en matière de l'outil ont été réalisées, pour séparer les effets de choc sur la plaquette, et des assistances sur l'usure. Comme illustrée sur la figure 3, la première entrée de l'outil dans la matière est directe alors que la seconde est progressive, avec un déplacement de l'outil suivant une trajectoire définie. Les conditions de coupe et les paramètres de réglage des assistances, sont représentés dans les tableaux 3 et 4. Un dynamomètre rotatif KISTLER 9170A monté sur l'attache (ARP5PR2503SA25M), permet de mesurer les valeurs des forces et des couples. Une seule plaquette RPHT1040MOE4-M MP9130 a été utilisée pour

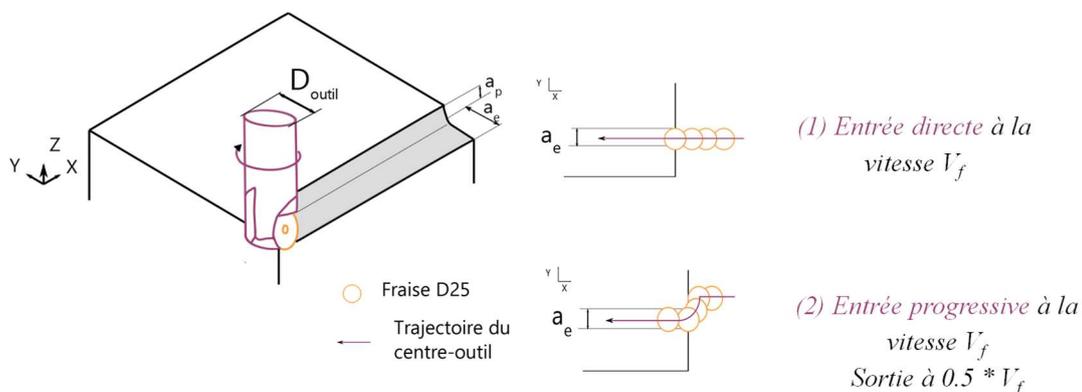


Figure 3 : Représentation des deux types d'entrée d'outil

économiser la matière. Elle est contrôlée après chaque passe (toute les deux minutes), sur un microscope KEYENCE pour suivre l'évolution de l'usure en dépouille ( $V_{Bmax}$ ).

Tableau 3 : Paramètres de réglage des assistances

Assistances	Paramètres
Emulsion (Blaser Vasco 7000, 12-13%)	6 l/min (360 kg/h) 2 buses, $D_{buse} = 5$ mm
scCO <sub>2</sub>	130 bars, 60 °C, 44 kg/h $D_{buse} = 0.2$ mm
scCO <sub>2</sub> + MQL	130 bars, 60 °C 44 kg/h + 40 ml/h $D_{buse} = 0.2$ mm

Tableau 4 : Conditions de coupe

Conditions de coupe	
$D_{outil}$ (mm)	25
Z	1
N (tr/min)	955
$f_z$ (mm/dent/tr)	0,15
$a_p$ (mm)	2
$a_e$ (mm)	15
$V_c$ (m/min)	75
$V_f$ (mm/min)	144

## 4 Résultats

### 4.1 Durée de vie

La figure 4 montre l'évolution de l'usure en dépouille ( $V_{Bmax}$ ) au cours du temps, pour les différentes assistances et pour les deux entrées retenues. Pour l'entrée directe, il y a une apparition rapide d'écaillage sur la face de dépouille, qui reste modérée pour le scCO<sub>2</sub> + MQL, comme le montre la figure 5. Malgré une évolution de l'usure par écaillage, cette usure reste bien moindre que celle de l'émulsion. En corrigeant l'entrée dans la matière de l'outil, il y a usure progressive pour les différentes assistances avec apparition d'un

écaillage en fin de vie d'outil pour le cas de l'émulsion, bien plus tard que pour l'entrée directe. L'usure avec  $\text{scCO}_2$  ou  $\text{scCO}_2 + \text{MQL}$ , reste très inférieure à celle de l'émulsion, ce qui confirme un refroidissement très efficace apporté par le  $\text{CO}_2$  supercritique. L'apport d'huile au  $\text{scCO}_2$ , se traduit par une légère différence entre les courbes  $\text{scCO}_2$  et  $\text{scCO}_2 + \text{MQL}$ , après 15 min d'usinage. Ceci confirme une amélioration de la durée de vie de l'outil, grâce aux micro-injections, comme le montre la figure 4-b. L'huile dissoute dans le  $\text{scCO}_2$ , atteint plus facilement l'interface outil/pièce et assure une lubrification plus efficace que celle de l'émulsion. Le frottement sur la face de dépouille est donc réduit, ce qui permet d'éviter l'usure de l'outil et d'allonger sa durée de vie. La performance du  $\text{scCO}_2 + \text{MQL}$  est donc due à la combinaison du refroidissement par changement de phase et de la lubrification par les micro-injections d'huiles dissoutes. Les essais ont été arrêtés dans le cas de l'entrée progressive (2) par manque de matière.

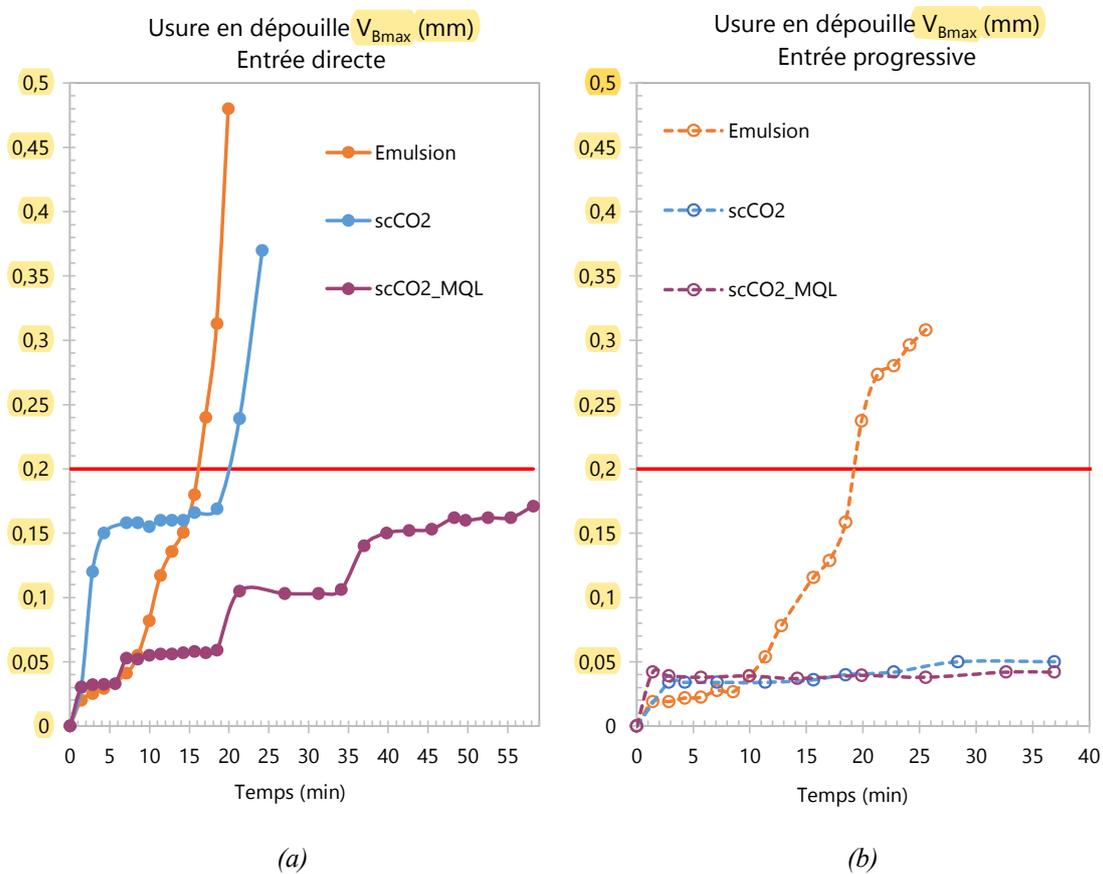


Figure 4 : Courbes d'usure ( $V_{Bmax}$ ) en fonction du temps d'usinage, pour l'entrée directe (a) et l'entrée progressive (b)

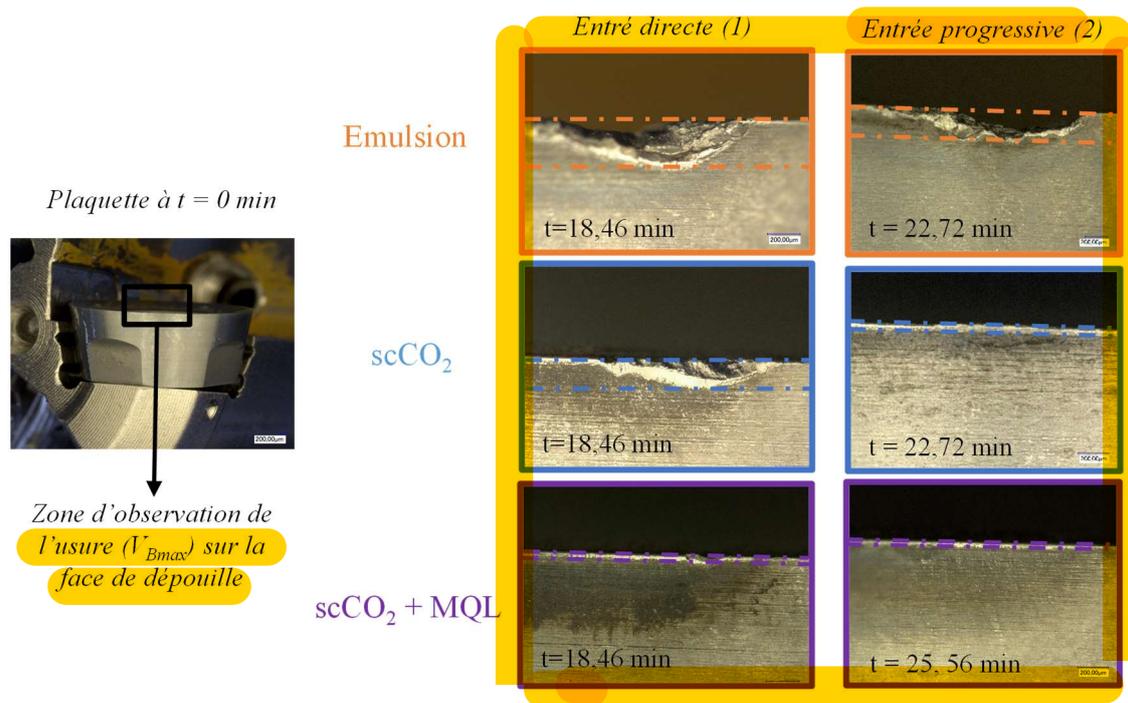


Figure 5 : Comparaison de l'usure en dépouille ( $V_{Bmax}$ ) pour les trois assistances, pour des temps usinage très proches et pour les deux types d'entrée d'outil

#### 4.2 Forces de coupe

Dans cette section sont comparés, les efforts de coupe pendant l'entrée progressive, pour les trois assistances. Les forces de coupe  $F_x$ ,  $F_y$  sont mesurées dans le repère tournant du dynamomètre rotatif, et ne correspondent pas directement aux forces dans les directions X, Y du repère machine, comme le montre la figure 6. Les forces tangentielles et radiales maximales furent donc calculées pour chaque essai, pour comparer l'effet des assistances sur les forces de coupe, dans le cas de l'entrée progressive (sans écaillage). La figure 7(a) représente l'évolution de la résultante de ces forces au cours du temps. Elle montre une nette différence entre les forces dans le cas de l'émulsion, et celles obtenues avec  $scCO_2$  ou  $scCO_2 + MQL$ , avec une augmentation rapide coïncidant avec l'usure rapide de l'outil. L'augmentation rapide des forces dans le cas de l'émulsion se fait autour de 15 min alors que l'usure rapide pour le même essai (figure 4b, entrée progressive, émulsion), apparaît

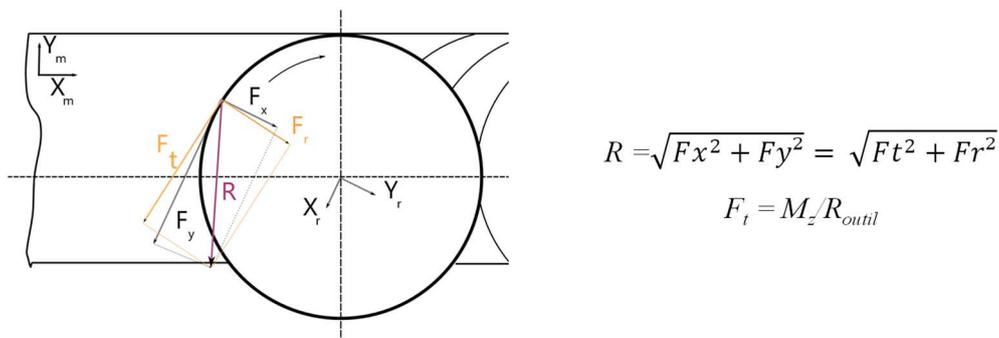


Figure 6 : Schéma des forces mesurées par le dynamomètre rotatif, et formules de conversion en forces tangentielles et radiales

plutôt vers 8 min. Cela pourrait s'expliquer par l'hypothèse que l'usure changeant localement l'angle de coupe de l'arête (réaffûtage), la coupe se fait avec moins d'effort malgré l'usure avancée.

Il n'y a pas de grande différence entre l'utilisation du scCO<sub>2</sub> avec ou sans MQL, sur le temps d'usinage considéré, comme le montre la comparaison des efforts et couples sur la figure 7(b). Des essais plus longs sont prévus pour mettre en évidence, l'apport du MQL sur l'évolution des forces de coupe, pour l'utilisation du scCO<sub>2</sub> + MQL.

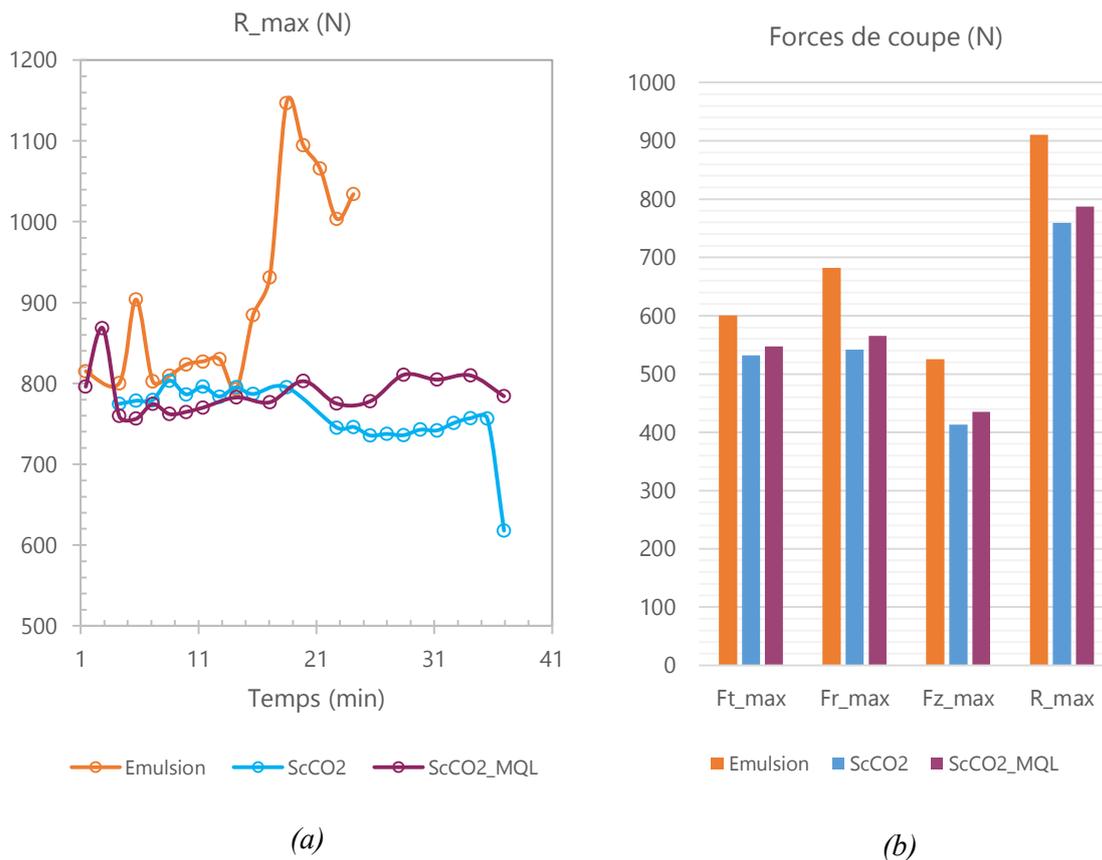


Figure 7 : (a) Evolution de la résultante ( $R_{max}$ ) des forces radiales et tangentielles maximales au cours du temps; et (b) Comparaison des moyennes des forces de coupe maximales pour tous les essais au cours du temps

## 5 Conclusion

Ces travaux, dont l'objectif était de tester l'usinage assisté par scCO<sub>2</sub>, dans le cas de la nouvelle station VENUS, montrent que cette assistance mérite une attention particulière et plus approfondie. Les essais réalisés ont permis de mettre en évidence l'effet très bénéfique du scCO<sub>2</sub> sur l'usure en dépouille de l'outil, dans le cas du fraisage du Ti6Al4V. Des études plus poussées permettraient de vérifier l'influence du scCO<sub>2</sub> sur l'intégrité de surface des pièces et de déterminer les conditions pour optimiser le refroidissement, grâce à l'analyse de la thermique par exemple. Des réflexions sont aussi à mener pour remplacer l'injection de l'huile (MQL) par d'autres fluides moins nocifs, dans le but d'améliorer encore plus le bilan carbone du procédé.

## Remerciements

Les auteurs remercient le CETIM, l'INSTITUT CARNOT ARTS et la Région Bourgogne Franche-Comté, pour le financement de ces travaux.

## Références

- Arafat, R., Madanchi, N., Thiede, S., Herrmann, C. and Skerlos, S. J., *Supercritical Carbon Dioxide and Minimum Quantity Lubrication in Pendular Surface Grinding - A Feasibility Study*, *Journal of Cleaner Production*, p. 13, 2021. DOI: 10/gm3sw4
- Clarens, A. F., Hayes, K. F. and Skerlos, S. J., *Feasibility of Metalworking Fluids Delivered in Supercritical Carbon Dioxide*, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 8, no. 1, pp. 47–53, January 2006. DOI: 10/d3kdx2
- Dang, J., Zhang, H., An, Q., Ming, W. and Chen, M., *Surface Modification of Ultrahigh Strength 300M Steel under Supercritical Carbon Dioxide (ScCO<sub>2</sub>)-Assisted Grinding Process*, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 61, pp. 1–14, January 2021. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.11.001
- Hyatt, J. A., *Liquid and Supercritical Carbon Dioxide as Organic Solvents*, ACS Publications, May 1, 2002.
- Jawahir, I. S., Attia, H., Biermann, D., Duflou, J., Klocke, F., Meyer, D., Newman, S. T., et al., *Cryogenic Manufacturing Processes*, *CIRP Annals*, vol. 65, no. 2, pp. 713–36, 2016. DOI: 10/gjnvsk
- Khanna, N., Agrawal, C., Pimenov, D. Y., Singla, A. K., Machado, A. R., Silva, L. R. R. da, Gupta, M. K., Sarikaya, M. and Krolczyk, G. M., *Review on Design and Development of Cryogenic Machining Setups for Heat Resistant Alloys and Composites*, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 68, pp. 398–422, August 2021. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.053
- Klocke, F. and Eisenblatter, G., *Presented at the Opening Session Dry Cutting, Keynote Papers*, p. 8, 1997.
- Mulyana, T., *The Influence of Cryogenic Supercritical Carbon Dioxide Cooling on Tool Wear during Machining High Thermal Conductivity Steel*, *Journal of Cleaner Production*, p. 13, 2017. DOI: 10/gbw9wv
- Perrut, M., *Extraction par fluide supercritique, Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique*, accessed May 18, 2022, from <https://www.techniques-ingenieur.fr/doi/10.51257/a-v1-j2770>, March 1999. DOI: 10.51257/a-v1-j2770
- Rahim, E. A., Jaafar, M. N., Mohid, Z., Ibrahim, M. R. and Ahmad, S., *A Study on Cryogenic Supercritical Carbon Dioxide Coolant Delivery Technique When Machining of AISI 1045 Steel*, p. 13, 2018.
- Shah, P., Khanna, N., Maruda, R. W., Gupta, M. K. and Krolczyk, G. M., *Life Cycle Assessment to Establish Sustainable Cutting Fluid Strategy for Drilling Ti-6Al-4V*, *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 30, p. e00337, December 2021. DOI: 10.1016/j.susmat.2021.e00337
- Stephenson, D. A., Skerlos, S. J., King, A. S. and Supekar, S. D., *Rough Turning Inconel 750 with Supercritical CO<sub>2</sub>-Based Minimum Quantity Lubrication*, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, no. 3, pp. 673–80, March 2014a. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.10.003
- Stephenson, D. A., Skerlos, S. J., King, A. S. and Supekar, S. D., *Rough Turning Inconel 750 with Supercritical CO<sub>2</sub>-Based Minimum Quantity Lubrication*, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, no. 3, pp. 673–80, March 2014b. DOI: 10/f5qznd
- Tai, B. L., Stephenson, D. A., Furness, R. J. and Shih, A. J., *Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Automotive Powertrain Machining*, *Procedia CIRP*, vol. 14, pp. 523–28, 2014. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.044
- Wika, K. K., Gurdal, O., Litwa, P. and Hitchens, C., *Influence of Supercritical CO<sub>2</sub> Cooling on Tool Wear and Cutting Forces in the Milling of Ti-6Al-4V*, *Procedia CIRP*, vol. 82, pp. 89–94, 2019. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.169
- Yu, W., Chen, J., Ming, W., An, Q. and Chen, M., *Feasibility of Supercritical CO<sub>2</sub>-Based Minimum Quantity Lubrication to Improve the Surface Integrity of 50% SiP/Al Composites*, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 73, pp. 364–74, January 2022. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.11.022
- Yuan, Y., Wang, C., Yang, J., Zheng, L. and Weiqiang, X., *Performance of Supercritical Carbon Dioxide (ScCO<sub>2</sub>) Mixed with Oil-on-Water (OoW) Cooling in High-Speed Milling of 316L Stainless Steel*, *Procedia CIRP*, vol. 77, pp. 391–96, 2018. DOI: 10/gkdf8r
- Zhang, H., Dang, J., An, Q., Ming, W., Chen, M. and Zhang, J., *Investigation of Machinability in Milling of Inconel 718 with Solid Sialon Ceramic Tool Using Supercritical Carbon Dioxide (ScCO<sub>2</sub>)-Based Cooling Conditions*, *Ceramics International*, p. S0272884221034398, November 2021. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.11.032
- Zou, F., Zhong, B., Zhang, H., An, Q. and Chen, M., *Machinability and Surface Quality During Milling CFRP Laminates Under Dry and Supercritical CO<sub>2</sub>-Based Cryogenic Conditions*, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, from <https://link->

*springer-com.rpl.ensam.eu/article/10.1007%2Fs40684-021-00386-9, 2021. DOI:  
10.1007/s40684-021-00386-9*