



Test d'un lubrifiant sans huile en tournage de l'acier 316L pour la fabrication hybride additive-soustractive

Felipe Rahn¹, Alexandre Gilbin¹, Michaël Fontaine^{1,*}, Xavier Roizard¹, Jean-Marie Melot², Fabrice Lallemand²

¹Université Bourgogne Franche-Comté, CNRS/ENSMM/UFC, Institut FEMTO-ST (UMR 6174), Dept. Mécanique Appliquée, 24 chemin de l'épître 25000 Besançon, France

²Université Bourgogne Franche-Comté, CNRS/UFC, Institut UTINAM (UMR 6213), Equipe SRS, 16 Route de Gray, 25030 BESANCON Cedex, France

* Correspondant : michael.fontaine@ens2m.fr

Résumé : La fabrication hybride additive-soustractive est au centre des préoccupations industrielles et des machines permettent à présent d'enchaîner les deux types de techniques sans démontage de la pièce. Cependant des problèmes de mise en œuvre demeurent, tels que l'utilisation de fluide de coupe en usinage, dont la présence résiduelle peut gêner des reprises en dépôt de métal. On s'intéresse ici à l'utilisation d'un lubrifiant sans huile plus facile à sécher et ne produisant pas de pollution des surfaces tout en limitant les risques sanitaires pour les utilisateurs. Ce lubrifiant, à base d'eau et de molécules actives venant se déposer sur les surfaces, a été initialement développé sous forme hydro-alcoolique et a démontré ses atouts en forgeage, mais une nouvelle version à base d'eau est testée ici. Son efficacité est comparée à celle constatée de lubrifiants traditionnels de l'usinage à l'outil coupant ainsi qu'avec le cas à sec. Il est constaté à partir de mesures d'efforts, d'états de surface et d'usure des plaquettes carbures en tournage d'un acier inoxydable 316L, que le pouvoir lubrifiant et refroidissant de ce type de fluide sans huile est comparable aux fluides habituels avec des avantages écologiques et sanitaires prouvés par d'autres études. L'usure en dépouille constatée est du même ordre qu'avec une huile entière, la rugosité obtenue du même ordre qu'avec une huile soluble, et il n'est pas constaté de différence notable sur le niveau d'efforts de coupe générés. Ce travail ouvre la voie à d'autres études pour des procédés plus complexes tels que le perçage, le fraisage ou le micro-usinage.

Mots clés : Coupe, Lubrifiants, Fabrication hybride, Tournage, Ecologie.

1 Introduction

De nouvelles méthodes de fabrication émergent afin de répondre à la demande croissante de produits à forte valeur ajoutée. L'hybridation de procédés de fabrication est devenue l'un des vecteurs principaux d'innovation afin de produire des produits à l'architecture optimisée (Merklein, 2016). En combinant notamment la fabrication additive par dépôt de matière fondue ou par frittage sélectif avec la fabrication soustractive comme l'usinage à l'outil coupant, il est possible de réaliser des pièces complexes bien finies avec une meilleure productivité. Les avantages de chaque technique sont alors utilisés au bon endroit et au bon moment afin d'optimiser le processus de fabrication. Par exemple, l'effet d'escalier résultant souvent des opérations de fabrication additive par dépôt métallique peut être éliminé par des finitions locales en tournage-fraisage (Du, 2016).

Cependant de nouveaux défis naissent de cet enchaînement rapide d'opérations très différentes, comme la difficulté de procéder à des traitements thermiques après les opérations additives afin de relâcher les contraintes par exemple, ce qui risque de faire perdre la tolérance d'usinage si un traitement thermique n'est réalisé qu'à la toute fin de la gamme de fabrication. L'autre défi, qui nous intéresse ici, est l'utilisation d'un lubrifiant, si important pour le processus de coupe, mais qui peut gêner le dépôt de métal par addition et amplifier la formation de porosités. Selon (Ng, 2009), les pores sont majoritairement initiés par des bulles de gaz piégées dans l'amas de poudre. En considérant un balayage laser en LMD (dépôt de métal en fusion), le traitement de séchage des poudres, la puissance du laser ou la taille moyenne des particules ont une grande influence sur la porosité produite (Zhong, 2015). En considérant la présence d'un fluide susceptible de brûler, cette tendance augmente considérablement (Barckhoff, 2005). Il a démontré que le traitement de séchage a une influence significative sur la porosité résultante et que l'utilisation d'une poudre asséchée pouvait la réduire drastiquement (Cortina, 2018). Dans les machines hybrides, comme les opérations de dépôt de métal et d'usinage sont intercalées, la pièce doit généralement être nettoyée, donc dégraissée puis séchée, avant le dépôt métallique pour limiter la porosité. L'utilisation de pulsations avec un Laser nanoseconde semblent permettre de préparer le substrat de poudre avant dépôt ou frittage sélectif et que cela réduit considérablement la porosité résultante dans la pièce (Alshaer, 2014). Néanmoins ce type de techniques ne peut pas être employé pour tous les procédés additifs ou dans toutes les machines, de plus il augmente le coût et le temps de process et reste risqué concernant des fluides à haute teneur en huile.

Le travail présenté ici s'attache à tester une solution de lubrification des étapes d'usinage qui limiterait voire supprimerait les étapes de dépollution des surfaces entre les opérations de fabrication hybrides tout en améliorant les conditions d'usinage et la durée de vie des outils coupants. De nouveaux fluides sans huile font leur preuve pour différentes applications dans lesquelles le frottement est un paramètre clé. Il s'agit de lubrifiant utilisant le principe de monocouche auto-assemblée (SAM) par greffage de molécules en solution dans le fluide sur des surfaces exposées à celui-ci. Les molécules d'acide alkylphosphonique sont notamment réputées pour agir sous forme de couches protectrices formées par réaction chimiques avec une surface métallique grâce à un haut niveau de réaction chimique avec les oxydes (Rudnick, 2009). Les molécules d'acide alkylphosphonique en additif dans des lubrifiants ou de l'alcool ont récemment

démontré leur capacité à former un tribofilm générant de bas niveau de frottement en se greffant sur des substrats d'acier inoxydable (Raman, 2006), de cuivre (Roizard, 2016) ou encore de titane (Zhang, 2014). Toutes les applications ne permettent pas l'utilisation d'acide alkylphosphonique associé à de l'alcool s'évaporant très rapidement et pouvant s'enflammer, mais des émulsions peuvent être réalisées dans une base aqueuse, comme dans cette étude. Dans tous les cas, ces solutions de lubrification permettent de limiter les étapes de nettoyage, ne nécessitent pas de traitement chimique lourd après utilisation et respectent les opérateurs.

Ces éléments justifient de tester ces solutions en usinage et notamment dans le cadre de la fabrication hybride. Ainsi des essais de tournage de l'acier inoxydable 316L sont présentés ici, d'essais simples de criblage en chariotage à des essais d'usure normalisés de 15 min. Les efforts de coupe, les états de surface générés puis l'usure en dépouille sont comparés afin de discuter de l'efficacité et de la pertinence d'un tel fluide de coupe en usinage.

2 Essais de tournage

2.1 Moyens expérimentaux

Tous les essais sont réalisés sur un tour 4 axes Doosan® Lynx 220Y proposant une puissance de broche de 15kW et une fréquence de broche maximale de 6000 tr/min.

Les pièces échantillons sont obtenues à partir de barres de diamètre 80 mm en acier AISI 316L, un acier inoxydable austénitique très employé en fabrication additive. Le diamètre est réduit passe après passe jusqu'à 30 mm sans passer sous cette valeur afin de conserver une bonne rigidité de pièce pendant l'essai. Les plaquettes de coupe sont en carbure de tungstène avec un revêtement multicouche : TiCN, Al_2O_3 et TiCN. Une plaquette losange d'ébauche et une de finition sont choisies sur recommandation fournisseur pour réaliser des essais de chariotage en conditions industrielles : désignation ISO CCMT09T308 et ISO CCMT09T304, avec un rayon de bec de 0,8 mm et de 0,4 mm respectivement. Après découpe des plaquettes, polissage et observation au microscope numérique, l'épaisseur des revêtements est identifiée comme étant de l'ordre de 5 μm avec un rayon d'acuité d'arête global de 50 μm environ.

La densité a été mesurée à température ambiante par dosage et pesage (moyenne sur 5 mesures) et la viscosité à l'aide d'un viscosimètre rotatif Haake 550 pour une vitesse de cisaillement de 146 à 1300 s^{-1} et une température de 20°C à 100°C.

2.2 Conditions de coupe

En se basant sur les recommandations du fournisseur, des conditions sont déterminées afin de réaliser des essais de calibration (Tableau 1). Pour chaque opération (ébauche et finition), 9 combinaisons de paramètres sont testées et tous les essais sont doublés, voire triplés lorsqu'une légère divergence est constatée sur les 2 premières mesures. Un plan d'expérience complet a été préféré en raison du nombre limité de paramètres déjà bien cadré par des recommandations éprouvées industriellement.

Des essais de durée de vie sont ensuite réalisés en respectant la norme ISO associée (ISO, 1993). Les conditions de coupe retenues pour ses essais sont : $V_c = 200$ m/min, $f = 0,1$ mm/tr et $a_p = 1$ mm.

Tableau 1 : Conditions de coupe pour essais de chariotage

Type d'essais	Vitesse de coupe V_c [m/min]	Avance par tour f [mm/tr]	Profondeur de passe a_p [mm]
Ebauche	120 - 200 - 300	0,1 – 0,2 – 0,4	1
Finition	120 - 200 - 300	0,1 – 0,15 – 0,2	0,5

Afin de tester l'efficacité d'une solution de lubrification sans huile, les différents lubrifiants suivants sont choisis pour être comparés lors des essais :

- Usinage à sec, afin de posséder une référence au pire des cas.
- Huile entière (Castrol® CARECUT ES2), afin de proposer une référence éprouvée pour l'usinage industriel des aciers inoxydables, notamment en décolletage (densité : 855 kg/m³ à 20°C, viscosité : 3,38 MPa à 1000 s⁻¹ et 100°C).
- Huile soluble (Jeffacool® Poly-Shape), avec une concentration d'huile de 5% - un lubrifiant recommandé par un fabricant de machine de fabrication hybride (densité : 978 kg/m³ à 20°C, viscosité : 0,66 MPa à 1000 s⁻¹ et 100°C).
- Lubrifiant sans huile à base d'eau (AFULudine® AFO7), intégrant des molécules d'acide alkylphosphonique dissoutes dans l'alcool puis mise en émulsion dans l'eau (7% de concentration finale) – une nouvelle génération de lubrifiants basés sur l'adoption de SAM (monocouches auto-assemblées) sur les surfaces en contact (densité : 971 kg/m³ à 20°C, viscosité : 0,7 MPa à 1000 s⁻¹ et 100°C).

2.3 Critères de comparaison

Les efforts de coupe sont acquis par l'intermédiaire d'un dynamomètre à capteurs piézoélectriques (KISTLER® 9129AEO) connecté à un amplificateur multicanaux (KISTLER® 5070) permettant de transformer les différences de charge en sortie de platine en différence de potentiel exploitable par un système d'acquisition de signaux électriques (solution National Instrument®+ PC portable). Les trois composantes d'efforts sont étudiées (effort de coupe F_c , d'avance F_f et transverse F_t) mais ne sont présentés ici que les résultats concernant F_c . Notons que les tendances expérimentales sont les mêmes sur les trois directions d'efforts.

L'état de surface des cylindres produits est contrôlé à l'aide d'un profilomètre à stylet sur une longueur de 10 mm. Le paramètre caractéristique de comparaison choisi est R_a , la rugosité moyenne arithmétique du profil, classiquement employée en tournage, et évalué selon la norme ISO 4287.

Enfin, l'usure d'outil est analysée par l'intermédiaire d'un microscope numérique (KEYENCE® VH-ZST) permettant des grossissements de 20 à 2000x. En accord avec la norme ISO 3685, le critère V_B représentant la longueur d'abrasion moyenne en dépouille, est utilisé pour caractériser l'usure de l'outil.

3 Résultats obtenus

3.1 Efforts de coupe et rugosité

Cette section présente les résultats des essais de chariotage selon les conditions présentées dans le Tableau 1 et menés avec les différents modes de lubrification cités.

Premièrement, une très bonne fidélité des valeurs d'efforts et de rugosité est constatée à partir des essais doublés avec une différence maximale relevée de 10%. De plus des tendances habituelles sont constatées ici, à savoir une faible influence de la variation de vitesse de coupe sur les résultats dans les plages conventionnelles testées et pour un lubrifiant donné, alors que la variation d'avance produit des écarts significatifs. C'est en accord avec les résultats constatés par d'autres auteurs pour le tournage de ce matériau (Nur, 2017). En conséquence, il est choisi par la suite de présenter uniquement des valeurs d'efforts et de rugosité moyennées pour les différentes vitesses de coupe testées (Figures 1 (a), (b) et (c)). L'évolution de l'effort de coupe F_c en fonction de la vitesse de coupe jusqu'à 750 m/min est néanmoins fournie afin d'observer les différences entre domaines de vitesse conventionnelle et grande vitesse (Figure 1(d)).

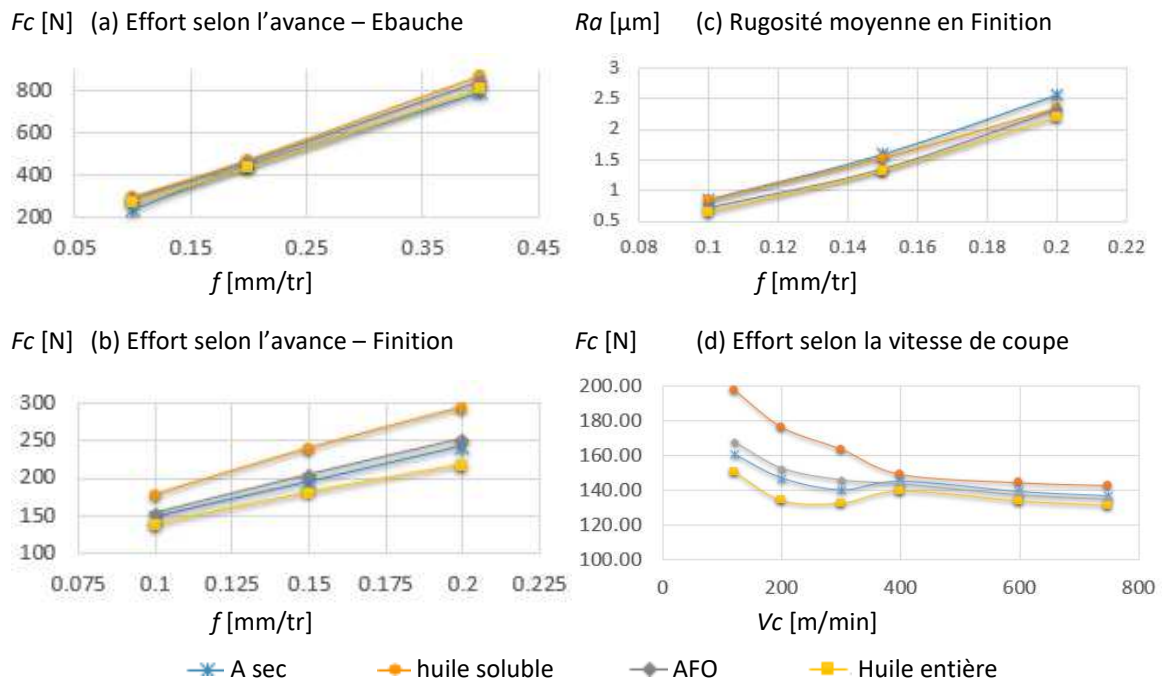


Figure 1 : Résultats d'effort F_c et de rugosité R_a obtenus avec les différents lubrifiants : (a), (b) et (c) moyennes de valeurs obtenues pour $V_c = 120, 200$ et 300 m/min ; (d) valeurs obtenues pour $f = 0,1$ tr/min en finition

On observe que dans les configurations testées, les écarts d'effort de coupe généré et de rugosité produite sont réduits en fonction du mode de lubrification utilisé. L'effort de coupe en ébauche n'est pas réellement impacté par le mode de lubrification et les écarts observés sur la rugosité produite sont faibles en finition. Seule les huiles traditionnelles se démarquent sur les efforts de coupe et d'avance en finition : l'huile soluble tend à amplifier l'effort généré en finition, notamment à vitesses de coupe réduites (entre 120 et 300 m/min) alors que l'huile entière permet à chaque fois de minimiser les efforts, même si les écarts sont assez réduits avec l'AFO ou sans lubrification. Les mécanismes de lubrification semblent donc influencer sur le cycle de rodage des plaquettes et tous les fluides ne semblent pas réussir à approcher et lubrifier la zone de coupe avec autant d'efficacité. Une augmentation de la vitesse de coupe (400,

600 et 750 m/min) tend à réduire encore les écarts et à uniformiser les comportements observés (Figure 1(d)).

Ces résultats indiquent que l'outil choisi associé aux conditions de coupe testées semble être très favorable pour l'usinage de l'acier 316L. De plus, les effets du frottement modifié à l'interface outil/pièce et outil/copeau par le changement de lubrifiant s'avèrent réduits par rapport aux efforts générés pour enlever la matière (cisaillement principalement). Si les phénomènes mis en jeu sont peu discriminants en phase de rodage des plaquettes, il convient de vérifier l'évolution de l'usure sur des essais plus longs.

3.2 Usure des outils

La Figure 2 présente les faciès d'usure en dépouille des plaquettes après 15 min d'usinage d'ébauche ($V_c = 200$ m/min, $f = 0,1$ mm/tr et $a_p = 1$ mm) avec les différents lubrifiants. Tous les essais présentent de l'adhérence de matière en fin de contact outil-pièce mais la quantité de matériau adhérant est assez variable selon les essais pour un même lubrifiant. Il est possible d'observer une usure par abrasion plus prononcée pour le cas à sec mais les 3 autres cas nécessitent une quantification pour les comparer.

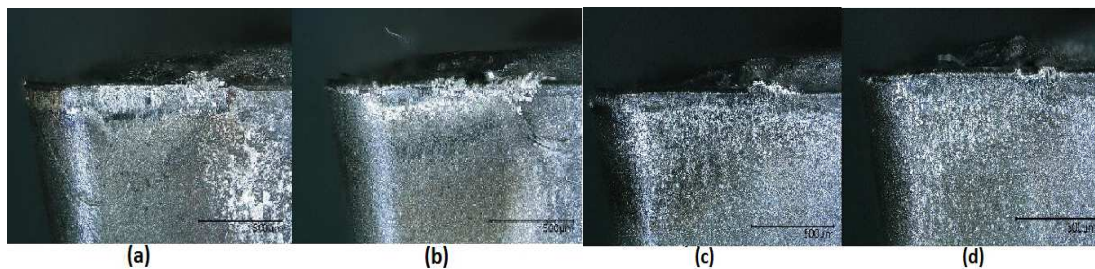


Figure 2 : Usure en dépouille pour : (a) Usinage à sec; (b) Huile entière; (c) Lubrifiant sans huile; (d) Huile soluble

La Figure 3 précise donc la tendance observée en proposant une comparaison de la hauteur d'usure moyenne V_B et de la rugosité moyenne résultante R_a . Les résultats obtenus avec le lubrifiant sans huile (AFO7) est proche de ceux obtenus avec l'huile entière en terme d'usure en dépouille et proche de l'huile soluble en terme de rugosité produite.

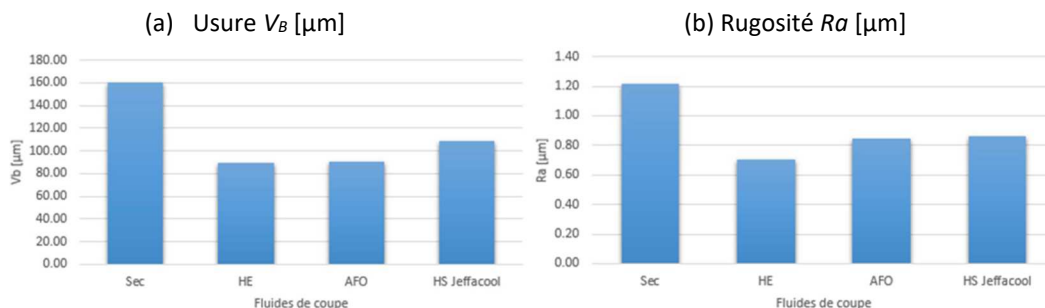


Figure 3 : Comparaison de l'usure moyenne en dépouille V_B (a) et de la rugosité moyenne R_a (b) pour différents modes de lubrification en tournage de finition du 316L

4 Conclusions

Dans cette étude des fluides de coupe sont comparés et discriminés dans le cadre d'une application en tournage de l'acier 316L pour un contexte de fabrication hybride additive-soustractive. L'objectif principal est de tester un nouveau type de lubrifiant sans huile composé d'eau et de molécules d'acide alkylphosphonique se déposant sur les surfaces arrosées et améliorant potentiellement les conditions tribologiques à l'interface outil-copeau et outil-pièce. Cette solution de lubrification présente l'avantage de sécher facilement sans étape de dégraissage, ce qui permet d'enchaîner des opérations de fusion de métal et d'usinage avec plus de facilité et de sécurité, sans pour autant priver les opérations d'usinage de lubrification alors qu'un matériau réputé à la fois dur et collant est usiné.

Différents essais de tournage instrumentés ont été réalisés afin d'aboutir aux conclusions suivantes :

- Les conditions de coupe testées ainsi que les outils sélectionnés sont très pertinents et génèrent peu de différences sur les efforts de coupe et les états de surface produits entre les différents lubrifiants, et ceci même pour le cas d'usinage à sec. Il est donc montré que l'évolution des conditions de frottement à l'interface outil-copeau et outil-pièce et de refroidissement de la zone de coupe change peu la phase de rodage des outils.
- Les essais d'usure montrent quant à eux des différences notables notamment concernant l'évolution de la hauteur moyenne d'usure en dépouille VB. Tous les lubrifiants augmentent la durée de vie de l'outil avec un avantage notable pour l'huile entière et le lubrifiant sans huile testés.
- En considérant que les performances d'usinage sont assez similaires entre les huiles testées et le produit sans huile, il convient de considérer d'autres critères que la performance en coupe. Tout d'abord, le respect de l'environnement et de l'opérateur en ce qui concerne les phases d'utilisation et de dépollution. En second lieu, l'application spécifique de cette recherche, la fabrication hybride. Comme un produit à base d'eau sèche très rapidement et n'a pas besoin d'un dégraissage, il ne dérange pas le dépôt de poudre ou de métal en fusion lors de la partie additive, ce qui est le cas des fluides de coupe huileux qui sont de plus potentiellement inflammables. Un simple séchage préliminaire par chauffage peut éliminer tout risque de perturber le procédé additif.

Afin d'avoir une vision globale de la comparaison, les fluides de coupe sont ici évalués suivant différents aspects. Des notes de 0 à 5 ont été données à chaque configuration et le résultat est présenté sur la Figure 4.

- Le critère « performance en usinage » est justifié par les résultats des essais présentés précédemment. L'huile entière est la référence, le cas à sec est le pire et l'huile soluble et l'AFO se situent très proches du niveau haut.

- Le critère « respect de l'environnement » prend en compte les risques environnementaux associés aux déchets. Le cas à sec et l'AFO ont reçu la note 4, sachant qu'il y a quand même une consommation de matière plus grande pour le cas à sec (les plaquettes s'usent plus vite) et de l'eau et des produits chimiques d'origine organique pour fabriquer l'AFO. Il n'y a pas une solution parfaite, mais ces deux sont les meilleures dans ce sens. Par contre, l'huile entière et l'huile soluble ont de grands problèmes liés à la contamination du sol, de l'eau et de l'atmosphère (Lafontaine, 2002).
- Le critère « santé des opérateurs » concerne la nocivité des fluides de coupe pour les personnes qui sont en contact avec eux. À nouveau, la note maximale est donnée pour le cas à sec et pour AFO, déjà certifié comme non nuisible à l'opérateur. En revanche, l'huile entière et l'huile soluble nécessitent des précautions supplémentaires, car ils peuvent causer de problèmes comme des pathologies cutanées ou même de cancers (De Paula Dias, 2000).
- Enfin, le critère « nettoyage des pièces » est liée à l'application spécifique du projet : la fabrication hybride. Comme déjà expliqué, l'AFO ne nécessite pas un dégraissage après l'usinage et s'évapore aisément, ce qui est assez intéressant pour le procédé. En ce qui concerne les deux huiles, il faut que la pièce soit nettoyée après chaque usinage pour éviter que les lubrifiants dérangent la partie additive. C'est un atout important également dans le cadre de l'usinage de pièces avec de fortes contraintes de non pollution des matériaux et surfaces qui les constituent (domaine biomédical surtout).

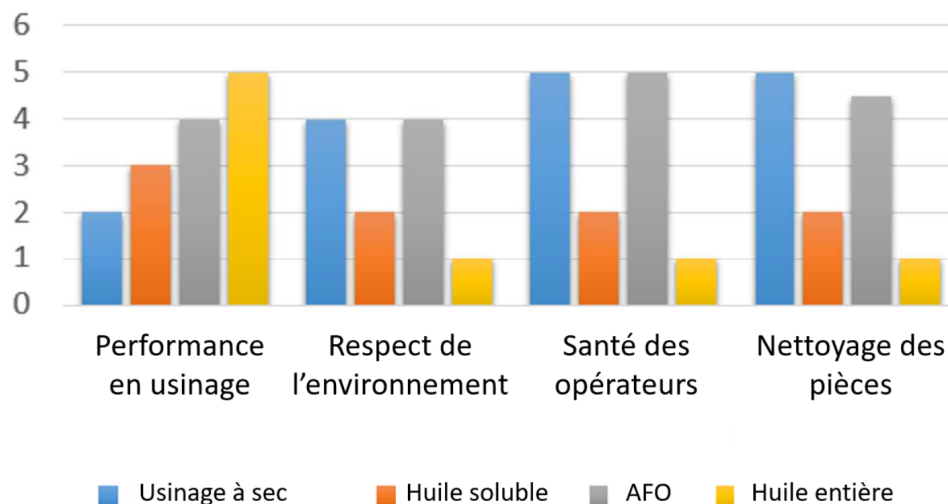


Figure 4 : Évaluation comparative des fluides de coupe testés en tournage du 316L

Il est important de remarquer que cette conclusion ne peut pas à ce stade être généralisée à toutes les conditions d'usinage même si des essais à plus grande vitesses de coupe ont également été réalisés (UGV). C'est une indication prometteuse, mais il faut tester d'autres configurations, afin de voir si les tendances sont maintenues. Par rapport à l'application spécifique de fabrication hybride, la suite du travail doit donc également avancer sur d'autres procédés d'usinage comme le fraisage et le perçage plus amplement employés dans les machines de fabrication hybride, pour lesquels l'arrivée du fluide dans la zone de coupe est contrariée et la coupe potentiellement discontinue.

Dans le même ordre d'idée, cette solution de lubrification semble prometteuse dans le cadre du micro-fraisage qui n'est pas adapté à l'arrosage abondant de l'outil ou encore à l'usinage sous contraintes fortes de non pollution des pièces, comme dans le secteur biomédical. Néanmoins, les solutions AFO testées dans cette étude restent à optimiser du point de vue de la corrosion car elles sont pour l'heure au moins aussi corrosives que l'eau seule et cela doit être réduit afin de garantir une utilisation dans une machine-outil sur le long terme. De même, la mouillabilité et la viscosité du produit doivent être étudiées et peut être améliorées. Enfin, une production en flux continu plutôt qu'en batch (cuve par cuve) permettrait d'améliorer la reproductibilité des émulsions, de limiter les risques en production (produits inflammables utilisés en petite quantité à la fois) et de limiter la consommation des produits chimiques (meilleur rendement).

Remerciements

Cette étude a été portée et cofinancée par l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (ENSM, Besançon, France) et la société AFULudine (Dole, France). L'étude a sollicité des moyens expérimentaux des plateformes AMETISTE (caractérisation des matériaux, structures et surfaces) et MIFHySTO (micro-fabrication mécanique et hybridation des procédés). L'Agence Fédérale Brésilienne pour le Support et l'Evaluation de l'Enseignement supérieur (CAPES) a permis l'échange scolaire entre l'ENSM et l'UNICAMP pour Felipe Rahn pendant la durée de ces travaux. Cette étude a été menée dans le contexte thématique du groupe de travail Manufacturing'21 regroupant 20 laboratoires français. Les thèmes abordés sont la modélisation et l'optimisation des procédés d'usinage et l'innovation dans le domaine de la fabrication mécanique.

Références

- A.W. Alshaer, L. Li, A. Mistry (2014) *The effects of short pulse laser surface cleaning on porosity formation and reduction in laser welding of aluminium alloy for automotive component manufacture*, *Optics and Laser Technology*, 64, pp. 162-171
- J.R. Barckhoff (2005) *Total Welding Management*, Miami, American Welding Society
- M. Cortina, J.I. Arrizubieta, E. Ukar, A. Lamikiz (2018) *Analysis of the influence of the use of cutting fluid in hybrid processes of machining and laser metal deposition (LMD)*, *Coatings*, 8, 61
- A.M. De Paula Dias (2000) *Avaliação ambiental de fluidos de corte utilizados em processos convencionais de usinagem*, Federal University of Santa Catarina, Brésil
- W. Du, Q. Bai, B. Zhang (2016) *A Novel Method for Additive/Subtractive Hybrid Manufacturing of Metallic*, *Procedia Manufacturing*, 5, pp. 1018-1030
- International Organization for Standardization (1993) *Tool-life testing with single-point turning tools*, ISO 3685
- M. Lafontaine, P. Delsaut, Y. Morèle (2002) *Risques liés à l'utilisation des fluides de coupe*, ND 2164, Institut National de Recherche et de Sécurité, Vandoeuvre-Lès-Nancy
- M. Merklein, D. Junker, A. Schaub, F. Neubauer (2016) *Hybrid additive manufacturing technologies - An analysis regarding potentials and applications*, *Physics Procedia*, 83, pp. 549-559
- G.K.L. Ng, A.E.W. Jarfors, H.Y. Zheng (2009) *Porosity formation and gas bubble retention in laser metal deposition*, *Applies Physics A*, 97, 641

R. Nur, M.Y. Noordin, S. Izman, D. Kurniawan (2017) Machining parameters effect in dry turning of AISI 316L stainless steel using coated carbide tools, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E, Journal of Process Mechanical Engineering*, 231-4, pp. 676-683

A. Raman, M. Dubey, I. Gouzman, E.S. Gawalt (2006) Formation of Self-Assembled Monolayers of alkylphosphonic acid on the native oxide surface of SS316L, *Langmuir* 22, pp. 6469-6472

X. Roizard, J. Heinrichs, A. Taouil, S. Jacobson, M. Olsson, J-M. Melot (2016) Insights into sliding wear and friction behavior of copper in ethanol containing alkylphosphonic acid molecules, *Tribology International* 96, pp. 141-148

L.R. Rudnick (2009) *Lubricant additives – Chemistry and applications*, 2nd edition, CRC Press

C. Zhang, Y. Liu, S. Wen (2014) Excellent tribological behavior of hexadecylphosphonic acid films formed on titanium alloy, *Science China – Technological Sciences* 57, pp. 1816-1823

C. Zhong, A.E.W. Jarfors, H.Y. Zheng (2015) Experimental study of porosity reduction in high deposition-rate laser material deposition, *Optics and Laser Technology*, 75, pp. 87-92