



HAL
open science

Évaluation de l'impact environnemental équivalent lors du fraisage d'une pièce en Aluminium sous lubrification conventionnelle, MQL ou à sec

Mael Jeulin, Philippe Darnis, Raynald Laheurte, Olivier Cahuc

► To cite this version:

Mael Jeulin, Philippe Darnis, Raynald Laheurte, Olivier Cahuc. Évaluation de l'impact environnemental équivalent lors du fraisage d'une pièce en Aluminium sous lubrification conventionnelle, MQL ou à sec. Conference Manufacturing21, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay [ENS Paris Saclay], Oct 2022, Gif Sur Yvette, France. hal-04011648

HAL Id: hal-04011648

<https://hal.science/hal-04011648v1>

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.



Évaluation de l'impact environnemental équivalent lors du fraisage d'une pièce en Aluminium sous lubrification conventionnelle, MQL ou à sec

Maël JEULIN^(a), Philippe DARNIS^(a), Raynald LAHEURTE^(a),
Olivier CAHUC^(a)

(a) Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33600 Pessac, France

Mail : mael.jeulin@u-bordeaux.fr

Résumé : Le secteur industriel et plus particulièrement celui de l'industrialisation constitue une part importante des émissions mondiales de Gaz à Effet de Serre (GES). C'est pourquoi de nombreuses études cherchent à modéliser et réduire l'impact environnemental des procédés. Ce travail portera spécifiquement sur le procédé de fraisage. La plupart des travaux se focalisent uniquement sur la quantification précise d'un aspect particulier de l'usinage tel que la consommation électrique d'une partie de la machine-outil ou encore l'usure spécifique des outils, généralement sans englober et comparer la totalité des facteurs du procédé qui impactent l'environnement. Pour répondre à ce besoin, cette étude propose une modélisation analytique de l'impact environnemental d'une opération simple de fraisage, considérant exclusivement les consommations ne dépendant pas de l'architecture de la machine-outil, pendant la phase d'usinage en cours. Pour cela, se basant sur la norme ISO 14955, un cadre d'étude a été clairement identifié afin de déterminer les paramètres influents sur l'impact environnemental du fraisage d'une pièce en Aluminium, pour ensuite modéliser les sources de consommation énergétique et de fluide qui contribuent à l'impact environnemental pendant l'usinage. En outre, une validation expérimentale permet de confronter les modèles théoriques proposés aux consommations réelles observées. Une évaluation de l'impact environnemental de cette opération de fraisage en g équivalent CO₂ (eq. Co₂) résulte alors de ces travaux.

Mots clés : éco-usinage, fraisage, lubrification, consommation.

1 Introduction

Le secteur industriel constitue une part importante des émissions mondiales de Gaz à Effet de Serre (GES), et plus particulièrement le secteur de l'industrialisation. La prise en compte des impacts environnementaux des procédés de fabrication par enlèvement de matière n'est pas récente même si la période actuelle accélère fortement l'intérêt des scientifiques pour le développement durable des procédés d'usinage. Les premiers travaux dans la littérature remontent aux années 1990 avec notamment les travaux de Byrne faisant un état de l'art des stratégies permettant de rendre les procédés d'usinage plus propre (Byrne, 1993) ou encore Munoz qui proposa des premières caractérisations globales de l'impact environnemental (IE) de ce type de procédés à partir de modèles analytiques (Munoz, 1995). Depuis, la proportion des articles en lien avec cette problématique ne cesse de s'accroître et de manière exponentielle dans les années 2010 (Sihag, 2020).

Néanmoins, ce domaine manque encore d'analyses sur les impacts environnementaux comparé à un domaine comme par exemple l'éco-conception où l'approche environnementale y est quasi systématique. Le secteur manufacturier constitue une source majeure de consommation énergétique, de ressources et de pollution. Du côté de l'industrie, un rapport intitulé « Notre avenir pour tous » (Brundtland, 1987), plus communément appelé « Rapport Brundtland » publié en 1987 par la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement de l'Organisation des Nations Unies, sensibilise et introduit le développement durable appliqué à plusieurs domaines, notamment le secteur industriel. Ce n'est que plus récemment que ces préoccupations environnementales ont touché de plus en plus les entreprises, désireuses de réduire leur empreinte écologique. La mise en œuvre de classements publics comme ceux de Corporate Knights (CK, 2022) incite les industriels à produire différemment. La performance environnementale de ces derniers y est quantifiée par la gestion des ressources et des déchets, pour laquelle la phase de fabrication prend une part importante. Cet article décrit un modèle analytique multi-facteurs simple de l'impact environnemental de l'usinage, permettant de caractériser l'émission en g CO₂ équivalent (eq. Co₂) d'une opération de fraisage. Le modèle développé a pour ambition de permettre aux industriels d'adapter les paramètres opératoires afin de prédire en amont l'impact environnemental de leur opération d'usinage. Premièrement, le contexte de l'étude ainsi que la définition du cadre de la modélisation sont définis. Dans un second temps, les modèles de consommations électriques ainsi que les différents modèles d'impact environnementaux sont présentés. Enfin, le dernier paragraphe est consacré à la validation expérimentale des différents modèles proposés.

2 Cadre de l'étude

Depuis de nombreuses années, plusieurs critères de mesures d'impacts globaux ont été introduits dans la littérature, allant jusqu'à la normalisation de la performance énergétique des machines-outils (ISO14955-1:2017, ISO14955-2:2018, ISO14955-3:2020). L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) des machines-outils selon la norme (ISO14955-1:2017) conclut que seule la phase d'utilisation de la machine-outil est pertinente à

considérer dans le cadre de l'étude de la consommation électrique. La phase d'utilisation de la machine peut alors se décomposer en plusieurs états d'utilisations tels que la veille, le démarrage, le préchauffage, l'état machine prête, le traitement en cours (phase d'usinage) et l'arrêt (classique ou d'urgence) (ISO14955-3:2020). Cependant, les consommations de la plupart de ces phases dépendent de l'architecture de la machine, ce qui ne peut pas être optimisé par l'opérateur. En effet, la norme ISO 14955-1 (ISO14955-1:2017) décrit exhaustivement les différents points de réduction énergétique, majoritairement sur la conception des machines-outils, mais également donne des préconisations sur les stratégies à optimiser. Hormis les aspects sur l'architectures des machines, la norme insiste donc sur les stratégies de fabrication (posages, trajets, ...), les conditions de coupe (productivité, énergie consommée) ou encore l'optimisation de la lubrification (ISO14955-1:2017). L'étude de ces différents aspects constitue l'objectif de ce travail.

La source majeure de consommation lors de l'usinage est l'énergie électrique mais elle est difficile à quantifier en totalité ; en cause, le nombre des composants des machines-outils qui représentent des sources de consommation importantes (Kordonowy, 2002). Cette étude se restreint donc uniquement sur les sources précises de consommation variable décrites par la norme (ISO14955-1:2017), c'est-à-dire celles qui vont différer selon la stratégie employée. Sont considérés dans le modèle les systèmes de pompes (allumés/éteints selon la lubrification), les moteurs d'axes et de broche à vide, ainsi que la puissance mécanique développée par la coupe. Cet article se focalise également sur l'influence de la technique de lubrification sur la consommation électrique mais aussi sur l'impact environnemental propre au lubrifiant, qu'il soit en partie évaporé ou brûlé, totalement consommé (microlubrification) ou non-utilisé. Le lubrifiant constitue une source d'impact environnemental importante aux vues de sa composition chimique. Par ailleurs, la consommation de matière, caractérisée par l'usure de l'outil coupant pendant l'usinage, pourrait également représenter un facteur important en termes d'impact environnemental, en raison notamment de la faible durée de vie des outils de coupe. Néanmoins, cet article proposant des essais sur un alliage d'aluminium A2017, les effets de l'usure des outils n'ont pas été intégrés dans l'étude proposée.

Les travaux se focalisent donc sur ces sources d'optimisation pendant la phase d'usinage, cherchant à comparer principalement deux sources d'impact environnemental de natures différentes (énergie électrique et lubrification). Une méthode de quantification de l'impact environnemental de la consommation électrique et du lubrifiant, permettant de comparer les différentes grandeurs, est proposée. La littérature identifie principalement des préconisations qualitatives de l'impact environnemental des stratégies de lubrification (ISO14955-1:2017), des évaluations de l'impact environnemental propre à la lubrification (Pusavec, 2010), ou alors seulement leur impact sur la consommation électrique (Shokrani, 2016). En réalité, les différences de consommation électriques selon la stratégie de lubrification ne sont pas forcément significatives par rapport à l'impact environnemental associé directement à l'utilisation de lubrifiants. La comparaison entre les deux types d'impacts environnementaux est alors nécessaire, ce qui est proposé par Campatelli (Campatelli, 2016).

Le choix de la machine-outil avec ses caractéristiques propres est donc assigné initialement. Les composants associés (ordinateurs, cartes d'asservissement, ventilateurs, etc.) ne constitueront donc pas, dans ce travail, un objectif d'amélioration recommandé par la norme (ISO14955-1:2017). La quantification de la consommation quasi-fixe associée n'est pas développée dans ces travaux car le temps d'usinage est identique pour chaque essai. L'intérêt se porte ici seulement sur les sources variables en vue d'optimiser leur consommation à terme. Un certain nombre de conditions initiales sont alors définies :

- La machine-outil (Mikron HSM600U), la composition du lubrifiant (Starcut LH21), et l'outil coupant (Fraise 15573503) sont identifiés et leurs propriétés utiles au modèle sont connues.
- L'opération de fraisage est un rainurage avec une stratégie de balayage.
- La provenance de l'électricité est supposée française pour le modèle.

Les paramètres du modèle que les opérateurs peuvent ainsi moduler sont :

- Les conditions de coupe (vitesse de coupe V_c , avance f , profondeur de passe a_p).
- Le type de lubrification utilisée, conventionnelle, micro-lubrification (MQL) ou à sec.

En considérant les différents composants de l'étude, l'impact environnemental modélisé se traduit de la manière suivante par la somme de l'ensemble des impacts élémentaires utilisés dans nos travaux (lubrifiant, électricité pompe, électricité axes, broche et la charge correspondant à la puissance mécanique développée par la coupe) (Eq.1) :

$$IE_{tot} = IE_{lub} + IE_{elec\ pompe} + IE_{elec\ axes} + IE_{elec\ broche} + IE_{elec\ charge} \quad (1)$$

Les termes de ce modèle sont explicités par la suite.

3 Modèles de consommation électrique

Afin de prédire la consommation électrique des composants principaux et secondaires de la machine-outil (axes, broche, pompes), une étude mécanistique préliminaire est réalisée pour modéliser leurs comportements. Ceux des composants principaux (axes, broche) ont été identifiés à partir de tests simples suivant la norme (ISO14955-3:2020). En effet, la puissance moyenne des axes et de la broche a été relevée sur plusieurs essais selon la vitesse des moteurs correspondants. Les figures 1 et 2 représentent les résultats obtenus et les modèles associés aux comportements de la broches et des axes X+, X-, Y+, Y- (modèle commun associé). L'axe Z n'étant pas sollicité pour les essais réalisés car l'axe retient le poids du bloc outil de la broche et sa puissance consommée associée (pour cet outil) est constante de l'ordre de 130W.

Pour ce qui est du modèle de puissance mécanique développée, le modèle utilisé découle de celui de Martellotti (Martelotti, 1941) mettant en évidence une pression spécifique de coupe selon les 3 directions de l'espace \vec{K}_c , avec des efforts de coupe linéaires en fonction

de la section de copeau S_{copeau} . Pour revenir à la consommation électrique, un coefficient de rendement $\eta_{meca/elec}$ entre la puissance électrique consommée et la puissance mécanique développée est utilisé (Eq.2) :

$$P_{elec\ charge} = \eta_{meca/elec} \cdot S_{copeau} \cdot (\vec{K}_c \cdot \vec{V}_{outil/pièce}) \quad (2)$$

La norme (ISO14955-2:2018) propose une consommation électrique équivalente associée aux consommations des systèmes auxiliaires (pompes, extracteurs) qui sont ici évalués directement sur les systèmes physiques à l'aide d'un wattmètre.

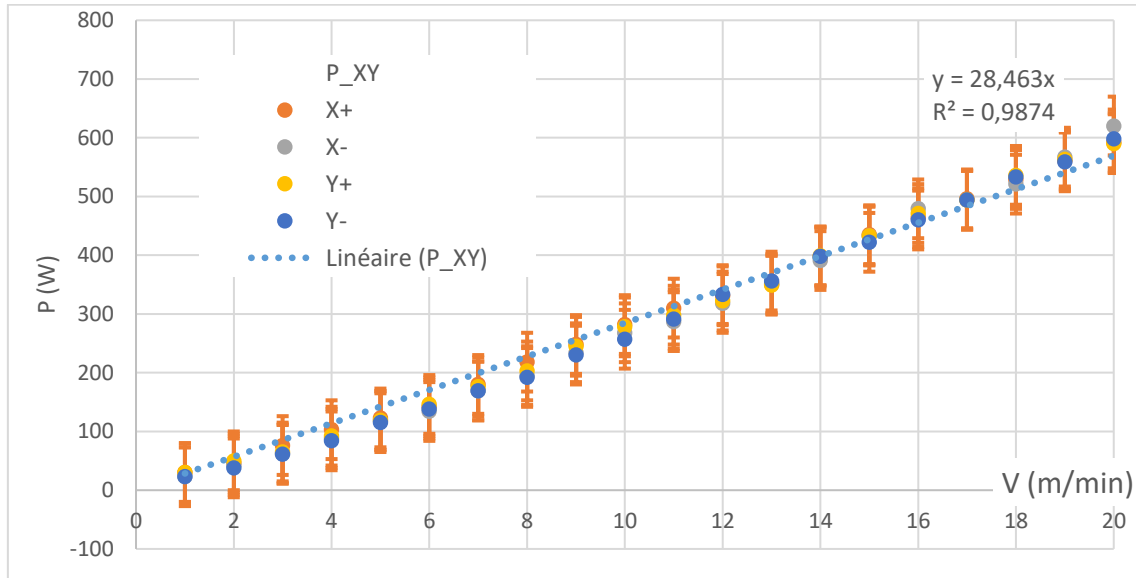


Figure 1 : Modélisation de la puissance électrique moyenne des axes à vide

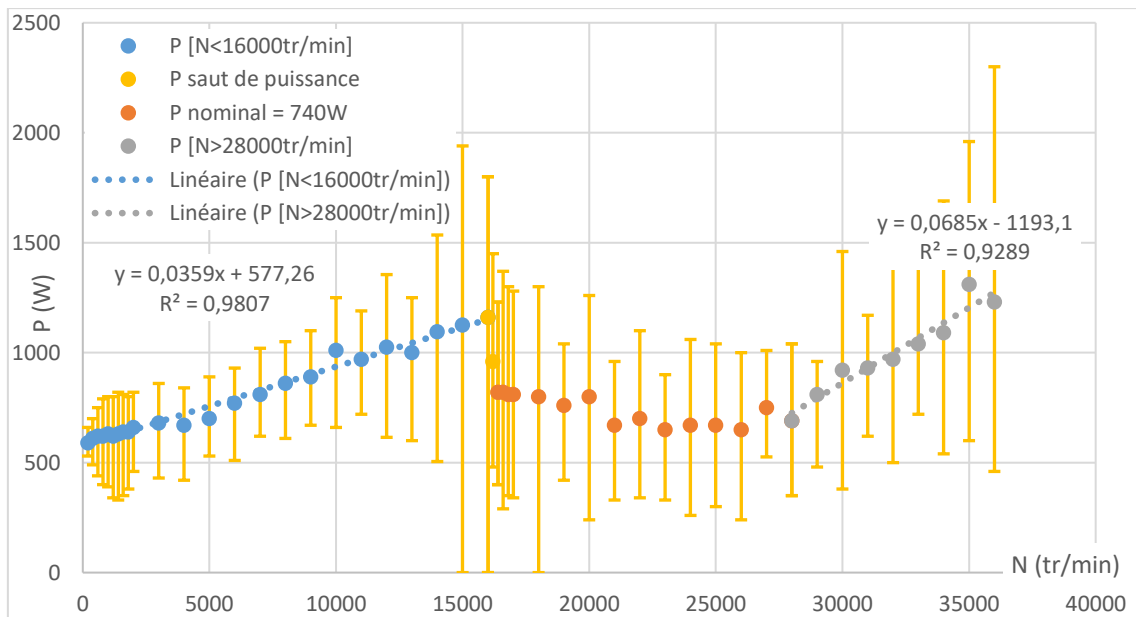


Figure 2 : Modélisation de la puissance électrique moyenne de la broche à vide

4 Modélisation des impacts environnementaux

4.1 Consommation de lubrifiant

L'impact environnemental des fluides de coupe est désigné majoritairement par la consommation du lubrifiant, qui dépend des trois types de lubrification employée dans ces travaux. Pour cela, un coefficient d'impact environnemental K_{lub} est défini, traduisant seulement l'impact carbone de sa consommation et non les critères de nocivité annexes (consommation de ressources fossiles, écotoxicité, biodégradabilité) ou encore les risques pour la santé si le fluide est dégradé par la chaleur engendrée par la coupe. La composition du lubrifiant étant inconnue précisément (UO, 2018), l'estimation de ce coefficient se base sur des ordres de grandeurs calculés par l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006). À partir de ces données, le coefficient K_{lub} peut être évalué à hauteur de 148 ± 5 g eq. Co₂/l pour une concentration de lubrifiant de 5%. De plus, à partir d'essais d'usinage de longue durée, l'évaporation et la perte du lubrifiant sont estimées à environ 8%/h.

Plusieurs modèles peuvent être alors décrits pour caractériser les différents types de lubrification considérés. Les paramètres des modèles sont les suivants :

- Coefficient d'évaporation (déterminé par les tests de Noack (ASTM, 2021)) qui traduit la consommation du lubrifiant : K_{Noack}
- Coefficient empirique de pertes du lubrifiant, induit par le non-recyclage de l'entière du fluide de coupe : K_{pertes}
- Débit de fluide de coupe engagé selon le type de lubrification : D_{fluide}
- Temps d'usinage effectif : t_{usin}
- Temps d'usinage matière : $t_{usin mat}$
- Coefficient d'impact environnemental du fluide de coupe, qui diffère selon le type de lubrifiant (huile minérale, végétale, ...) : K_{lub}

Le modèle proposé se restreint aux trois modes, à sec, MQL ou conventionnel, qui représentent les solutions usuelles dans l'industrie. Le renouvellement du lubrifiant est considéré lorsqu'il est entièrement consommé. L'usure du lubrifiant provoquée par la pollution de celui-ci au fil de son utilisation au contact du copeau n'est donc pas significative dans cette étude. Par ailleurs, les vidanges n'ont pas d'influence sur l'impact environnemental car le fluide est supposé filtré et réutilisé. Pour l'usinage en mode MQL, l'hypothèse suivante est considérée : le fluide de coupe est entièrement consommé, soit il est brûlé soit il se dépose sur les pièces de l'environnement d'usinage (copeaux, montage, etc.). Les différents modèles d'impact environnemental de la lubrification IE_{lub} sont décrits de la manière suivante :

- Usinage à sec (Eq.3) : Ne consomme pas de lubrifiant.

$$IE_{lub} = 0 \quad (3)$$

- Usinage à lubrification minimale MQL (Eq.4) : Consomme entièrement le lubrifiant mais à faible débit. La consommation résultante est alors directement la quantité de fluide de coupe utilisée pendant le temps d'usinage.

$$IE_{lub} = D_{fluide} \cdot t_{usin} \cdot K_{lub} \quad (4)$$

- Usinage avec lubrification conventionnelle (Eq.5) : Consomme partiellement le lubrifiant au fil de son utilisation par évaporation et par pertes.

$$IE_{lub} = D_{fluide} \cdot (t_{usin\ mat} \cdot K_{Noack} + t_{usin} \cdot K_{pertes}) \cdot K_{lub} \quad (5)$$

4.2 Consommation électrique

L'impact environnemental de l'énergie électrique a des sources très diverses. Effectivement, outre les composants consommant de l'électricité de manière régulière (ordinateurs, ventilateurs, etc.), de nombreux composants modulables sont régulés par l'énergie électrique (broche, axe, pompe de lubrification, charge). Cet impact peut se traduire par un coefficient K_{elec} dont la valeur dépend de la technologie employée pour la production de l'énergie, ce qui varie fortement selon le pays considéré. Pour estimer ce coefficient avec la production d'électricité (française dans notre cas), il suffit d'appliquer à la proportion de sources de production électrique leur impact carbone équivalent (ADEME, 2014). À partir de cette méthode, le coefficient K_{elec} peut être évalué à $0,101 \pm 0,0248$ g eq. Co₂/Wh.

Les paramètres du modèle d'impact environnemental de la consommation électrique IE_{elec} sont les suivants :

- Puissance électrique consommée : P_{elec}
- Temps d'usinage effectif : t_{usin}
- Coefficient d'impact environnemental de l'énergie électrique, qui diffère de sa nature de production (charbon, nucléaire, éolien, ...) : K_{elec}

Le modèle initial d'une consommation d'énergie électrique est donc juste l'intégration de la puissance électrique d'une entité selon le temps d'usinage (Eq.6) :

$$IE_{elec} = \left(\int_0^{t_{usin}} P_{elec}(t) \cdot dt \right) \times K_{elec} \quad (6)$$

5 Vérification expérimentale

5.1 Protocole expérimental

L'objectif est de réaliser un trajet simple dans la matière et d'analyser la consommation réelle par rapport à celle prédite par le modèle proposé. La machine-outil est une Mikron HSM600U équipée d'une commande numérique Heidenhain ITNC 530, permettant de récupérer les différentes données de la machine, comme les puissances électriques consommées, avec le logiciel TNC Scope. La puissance mécanique développée par l'usinage est quant à elle récupérée par l'intermédiaire d'une platine dynamométrique à 6 composantes Kistler 9129AA. On réalise des essais avec les conditions de coupe suivantes : $V_c = 1280$ m/min, $f = 0,074$ mm/dent et $a_p = 2$ mm. Le trajet est un rainurage de 100x60 mm² sur 7 passes en stratégie zig-zag. Les essais sont effectués avec les trois types de lubrification : à sec, minimale (MQL) et conventionnelle.

5.2 Résultats

Seulement l'essai en lubrification conventionnelle va être utilisé pour illustrer les résultats (Figure 3) afin de ne pas surcharger la figure. Pour identifier l'énergie électrique consommée par l'usinage, il suffit de soustraire l'énergie totale d'un même essai à vide. Pour mieux l'identifier, la puissance mécanique de la coupe est supposée reprise entièrement par la broche. La courbe verte représente la proportion d'erreur de l'entité par rapport à l'erreur d'identification de l'énergie totale. Globalement, le modèle électrique présente une fiabilité acceptable avec une erreur de 4% sur l'énergie totale consommée mesurée. En termes d'impact environnemental, l'opération atteint $0,74 \pm 0,1$ g eq. Co2 pour le premier essai, $0,82 \pm 0,1$ g eq. Co2 pour le second et $1,12 \pm 0,1$ g eq. Co2 pour le troisième.

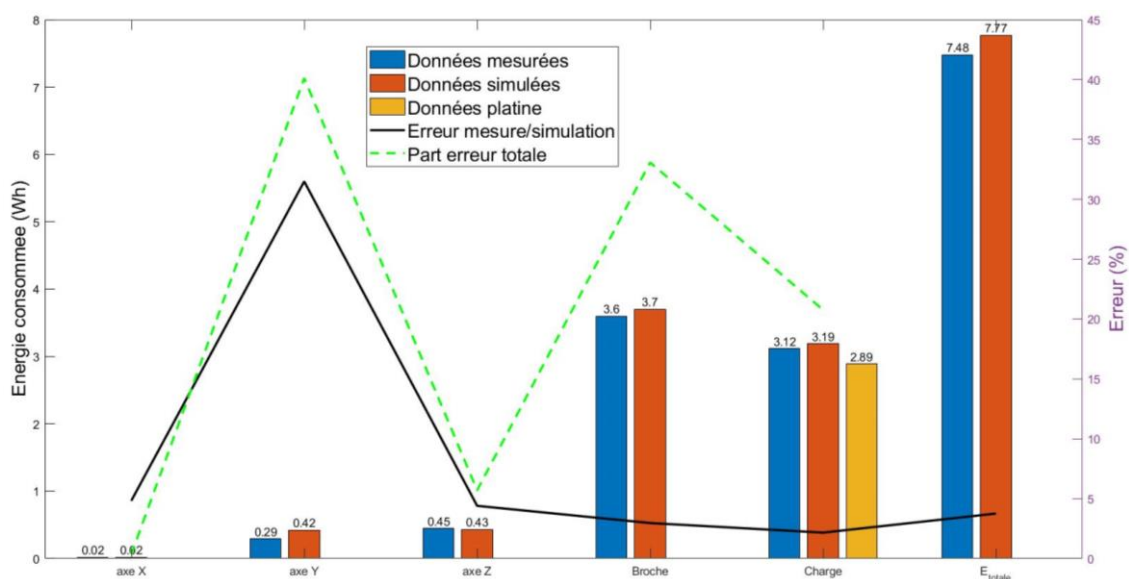


Figure 3 : Bilan énergétique des entités d'usinage simulées et réelles

5.3 Influence de la lubrification

Le même essai avec des techniques de lubrification différentes a été réalisé, avec pour objectif de vérifier l'impact environnemental du type de lubrification. La figure 4 représente les différentes sources d'impacts propres à chaque technique. La consommation électrique de l'essai en MQL sert de référence, seule la différence avec les autres essais est indiquée par la partie orange. En bleu est représenté l'impact environnemental propre à l'évaporation du fluide de coupe. La perte du lubrifiant pendant l'usinage est estimée à hauteur de 8%/h, ce qui indique une forte consommation pour la lubrification conventionnelle. En revanche, la technique MQL consomme beaucoup moins de lubrifiant et a également tendance à entraîner une diminution des efforts de coupe, comme le confirment certaines études (Masoudi, 2019) et donc la consommation électrique associée à la charge. Néanmoins, l'influence du lubrifiant sur la puissance mécanique de coupe développée reste marginale, notamment car les efforts de coupe dans l'aluminium restent faibles. En rouge se distinguent les 2 systèmes de pompe, différents pour la technique MQL et conventionnelle, respectivement un système de micro-lubrification Unilube avec une consommation majoritaire du compresseur d'air L15RS-7.5AV2 de Gardner Denver et une pompe Flender CF10-M1B4.

La figure 4 montre bien que la micro-lubrification donne des résultats plus favorables en termes d'impact environnemental global comparé à la lubrification conventionnelle, comme plusieurs études de la littérature le montrent (Pereira, 2016, Campitelli, 2019). L'usinage à sec présente naturellement un impact environnemental négligeable associé à la lubrification, cependant l'usinage à sec de l'aluminium présente des inconvénients avec un risque d'adhérence du matériau sur l'outil, ce qui peut engendrer la casse de l'outil coupant. Enfin, les modèles de consommation étant quasi-linéaires par rapport au temps d'usinage, les proportions du diagramme seraient respectées également pour un usinage plus long.

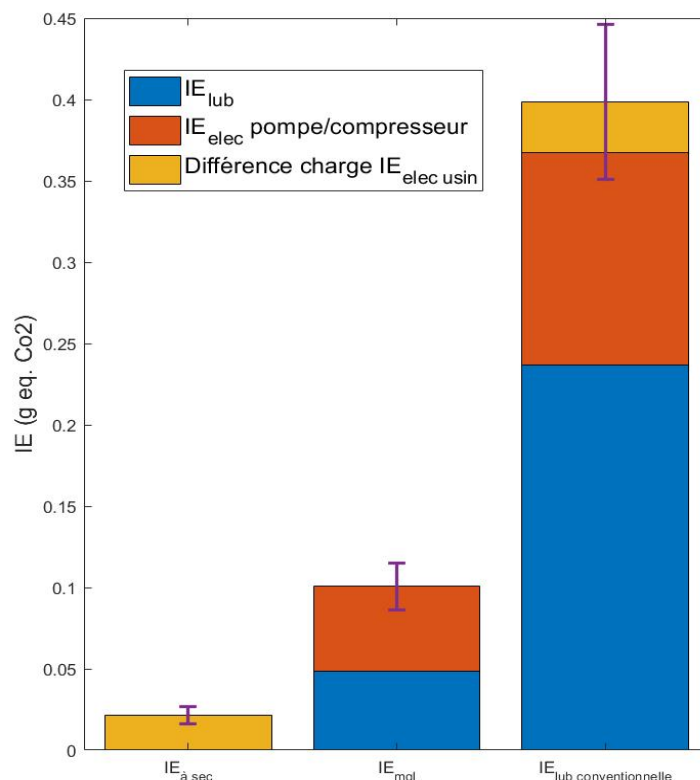


Figure 4 : Analyse de l'impact environnemental des techniques de lubrification

6 Conclusion

Cet article se positionne dans un contexte d'élaboration d'un modèle de caractérisation complète des grandeurs énergétiques et environnementales du procédé de fraisage. Il met en évidence, dans un premier temps, un modèle de consommation électrique et de lubrifiant d'une opération de fraisage pendant la phase d'usinage, avec une précision acceptable de 4%. Cette modélisation permet donc d'identifier l'impact environnemental d'une telle opération pour 3 techniques de lubrification (à sec, MQL et conventionnelle), et de pouvoir comparer l'impact de la consommation électrique par rapport à la consommation de lubrifiant. Cela permet donc une évaluation quantitative de l'impact environnemental de l'usinage en fraisage pour de l'aluminium et propose une aide à la décision de la technique de lubrification à employer. Néanmoins, seul l'impact carbone équivalent est pris en compte dans cette étude alors que le rayon d'impact des lubrifiants s'étend à d'autres critères environnementaux (consommation de ressources fossiles, écotoxicité, biodégradabilité) qui seront importants à considérer dans les futures études.

L'objectif sera ensuite de développer le modèle à l'aide d'essais complémentaires avec différents outils, différents matériaux et conditions de coupe, notamment pour valider le modèle proposé mais également pour faire apparaître, notamment, une usure de l'outil coupant quantifiable. Finalement, une optimisation de l'impact environnemental d'une opération en fonction de ses stratégies d'usinage (conditions de coupe, techniques de lubrification, paramètres du trajet) pourra être recherchée.

Références

- Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, (2014). *Documentation des facteurs d'émissions de la Base Carbone*®, Version 11.0.0.
- ASTM International. (2021). *Standard Test Method for Evaporation Loss of Lubricating Oils by the Noack Method* (ASTM No° D5800-21).
- Brundtland, G. H. (1987). *Our Common Future—Call for Action**. *Environmental Conservation*, 14(4) :291–294. Publisher : Cambridge University Press.
- Byrne, G. and Scholta, E. (1993). *Environmentally Clean Machining Processes — A Strategic Approach*. *CIRP Annals*, 42(1) :471–474.
- Campatelli, G. and Scippa, A. (2016). *Environmental impact reduction for a turning process: comparative analysis of lubrication and cutting inserts substitution strategies*. *5th CIRP Global Web Conference Research and Innovation for Future Production*, 55 :200-205
- Campitelli, A., Cristobal, J., Fischer, J., Becker, B. and Schebek, L. (2019). *Resource efficiency analysis of lubricating strategies for machining processes using life cycle assessment methodology*. *Resource efficiency analysis of lubricating strategies for machining*. *Journal of Cleaner Production*, 222 :464-475.
- Corporate Knights (2022). <https://www.corporateknights.com/rankings/global-100-rankings/2022-global-100-rankings/100-most-sustainable-corporations-of-2022/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, (2006). *Guidelines for National Greenhouse gas Inventories, Volume 2*.
- International Organization for Standardization. (2017). *Machines-outils – Évaluation environnementales des machines-outils - Partie 1: Méthode de conception pour l'efficacité des machines-outils* (ISO Standard No. 14955-1:2017).
- International Organization for Standardization. (2018). *Machines-outils – Évaluation environnementales des machines-outils - Partie 2: Méthode pour mesurer l'énergie apportée aux machines-outils et aux composants des machines-outils* (ISO Standard No. 14955-2:2018).
- International Organization for Standardization. (2020). *Machines-outils – Évaluation environnementales des machines-outils - Partie 3: Principe des essais des machines travaillant par enlèvement de métal à l'égard de l'efficacité énergétique* (ISO Standard No. 14955-3:2020).
- Kordonowy, D. N. D. N. (2002). *A power assessment of machining tools*. Thesis, Massachusetts Institute of Technology. Accepted : 2006-02-02T18 :48 :58Z.
- Martelletti, M.E. (1941). *An analysis of the milling process*. *Transactions of the A.S.M.E.*63(8),677–700.
- Masoudi, S., Esfahani, M.J., Jafarian, F. and Mirsoleimani, S.A. (2019). *Comparison the Effect of MQL, Wet and Dry Turning on Surface Topography, Cylindricity Tolerance and Sustainability*. *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech*.
- Munoz, A. A. and Sheng, P. (1995). *An analytical approach for determining the environmental impact of machining processes*. *Journal of Materials Processing Technology*, 53(3) :736–758.
- Pereira, O., Rodríguez, A., Fernandez-Abia, A. I., Barreiro, J. and Lopez de Lacalle, L. N. (2016). *Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304*. *Journal of Cleaner Production*, 139 :440-449.
- Pusavec, F., Krajnik, P. and Kopac, J. (2010). *Transitioning to sustainable production – Part I: application on machining technologies*. *Journal of Cleaner Production*, 18 :174-184
- Sihag, N. and Sangwan, K. S. (2020). *A systematic literature review on machine tool energy consumption*. *Journal of Cleaner Production*, 275 :123125.
- Shokrani, A., Dhokia, V. and Newman, S. T. (2016). *Energy conscious cryogenic machining of Ti-6Al-4V titanium alloy*. *Proc IMechE Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 1-17
- Unil Opal (2018). *Fiche de données de sécurité STARCUT LH 21, 335751UO*, <https://www.unil-opal.com/en/produit/starcut-lh-21-en/>.