

Identification des paramètres descripteurs de la qualité de surface en usinage robotisé du bois

NASRI Linda, CURTI Rémi, PERRIN Marianne, EYMA Florent

Institut Clément Ader (ICA) ; Université de Technologie Tarbes Occitanie Pyrénées ; CNRS, IMT Mines Albi, UPS, INSA, ISAE-SUPAERO ; IUT de Tarbes, 1 Rue Lautréamont, 65000 Tarbes, France
linda.nasri@iut-tarbes.fr

Mots clefs : usinage robotisé ; chêne ; efforts de coupe ; émission acoustique ; état de surface

Contexte et objectifs

Dans le contexte actuel d'évolution technologique rapide, la robotique industrielle constitue l'une des technologies les plus déterminantes dans divers secteurs. Toutefois, l'exploitation de cette technologie dans l'usinage du bois demeure limitée. D'après les données publiées par l'International Federation of Robotics IFR (2024), les installations de robots industriels en France entre 2008 et 2018 dans le secteur du bois et de l'ameublement ont représenté moins de 1 % des installations totales, avec aucune installation en 2018 et un stock opérationnel correspondant à seulement 0,6 % du stock total de robots industriels en France cette même année. De nos jours, si de nombreuses opérations de ponçage sont automatisées pour les pièces planes, les systèmes semi-automatiques et manuels restent prédominants pour les produits aux géométries complexes (Diez Cifuentes et al 2023). Parmi les freins qui peuvent empêcher la robotisation du procédé de ponçage du bois, c'est la variabilité naturelle du matériau qui constitue un obstacle majeur. En usinage du bois, les états de surface sont particulièrement sensibles à l'orientation du fil du bois usiné (Curti et al 2018, Goli et al 2018, Goli et Sandak 2016), ce qui rend difficile l'obtention d'un état de surface satisfaisant en tous points de la pièce lorsque l'orientation du fil varie. Le recours à des opérations de parachèvement, telles que le ponçage, devient alors nécessaire. À l'état actuel des connaissances, il n'existe pas d'approche d'optimisation robotisée de ponçage fondée sur la cartographie de surface issue des opérations d'usinage préalables, bien que plusieurs études aient tenté de contrôler la rugosité en usinage du bois à l'aide de moyens tels que les émissions acoustiques ou sonores (Aguilera et al 2007, Aguilera et Barros 2012, Derbas et al 2024, Iskra et Hernandez 2009, Iskra et Tanaka 2005).

Ces travaux de recherche visent donc à identifier les paramètres pertinents qui permettent de prédire et d'estimer la rugosité en usinage robotisé du bois à différentes orientations du fil, en utilisant simultanément les signaux d'émission acoustique et les efforts de coupe. L'objectif sera par la suite de proposer une stratégie de parachèvement robotisé basée sur les états de surface estimés, générés au cours de l'usinage.

Matériels et méthodes

Des échantillons de bois de chêne mesurant chacun 165 (T) × 55 (L) × 25 (R) mm³ ont été découpés selon six orientations du fil 0°, 30°, 60°, 90°, 120° et 150° (angle formé entre le fil de l'échantillon et la direction d'avance lors de l'essai d'usinage décrit ci-après) à l'aide d'une défonceuse à commande numérique (Dubus 3 axes). Toutes les éprouvettes sont issues de trois planches débitées sur dosse. Avant les essais d'usinage les éprouvettes de bois ont été conditionnées dans une enceinte climatique à une température 20 °C et à une humidité relative 65 %. L'humidité moyenne mesurée des éprouvettes avant les essais est égale à 13 ± 1 %.

L'usinage des éprouvettes a été effectué à l'aide d'un robot poly-articulé 6 axes (Kuka Kr 70) équipé d'une électrobroche d'usinage (HSD MT 1090 HSK A40 – Fig 1a). Les éprouvettes ont été usinées avec six conditions de coupe différentes et un engagement axial et radial constant, respectivement de 25 mm et 3 mm, pour générer une qualité de surface qui varie de la finition à l'ébauche soignée (Tab. 1). La coupe, réalisée en contournage suivant la direction tangentielle (Fig. 1b), a été effectuée en opposition, à l'aide d'une fraise munie de deux dents en acier rapide, d'un diamètre de 16 mm et avec un angle d'hélice de 30°. Chaque essai a été répété trois fois, pour un total de 108 échantillons (6 orientations × 6 conditions de coupe × 3 répétitions).

Tab. 1 : Paramètres de coupe appliqués en usinage

Condition de coupe	Vitesse d'avance (m/min)	Vitesse de rotation (tr/min)	Epaisseur moyenne de copeau (mm)
1	5	10000	0.11
2	10	10000	0.22
3	15	10000	0.33
4	5	20000	0.055
5	10	20000	0.11
6	15	20000	0.16

Au cours des essais d'usinage, les signaux d'émission acoustique (EA) et les efforts de coupe (F_c) ont été enregistrés. L'acquisition des signaux d'EA a été réalisée à l'aide de quatre capteurs piézoélectriques large bande de type F15α (Physical Acoustics), couramment utilisés dans la littérature. La plage de fréquence d'acquisition (100 kHz – 450 kHz) ainsi que le seuil de déclenchement fixé à 35 dB ont été déterminés à l'issue d'essais préliminaires. Le nombre de capteurs (quatre) correspond à la configuration disponible sur la chaîne d'acquisition. Leur positionnement est illustré en Fig. 1b : le capteur 1 est orienté selon la direction d'usinage (axe X de la pièce), le capteur 2 selon la direction perpendiculaire (axe Y), et le capteur 3 selon l'axe Z ; ces trois capteurs sont montés sur un dynamomètre triaxial Kistler 9366AB. Le capteur 4, également orienté selon l'axe Z, est fixé sur le montage de réhausse en MDF.

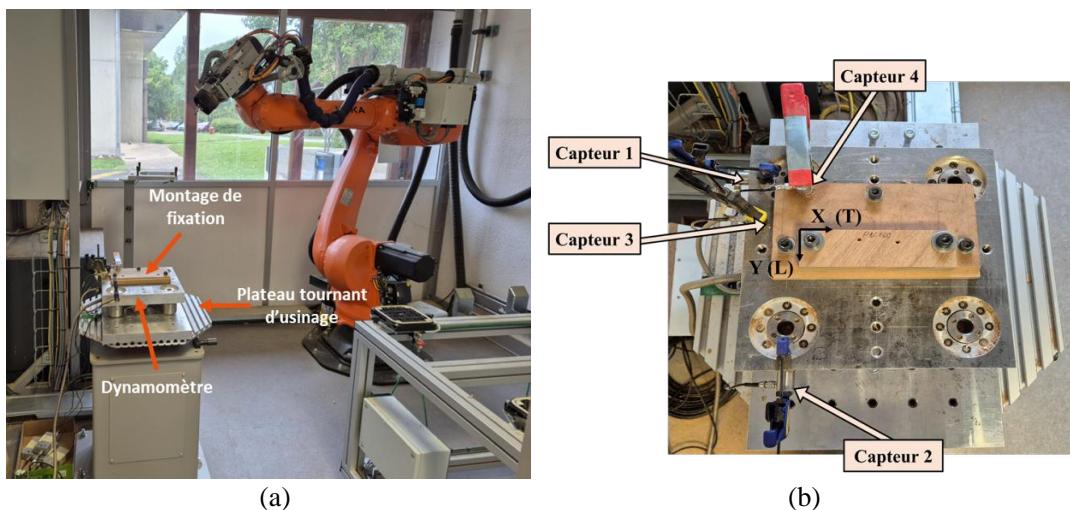


Fig. 1 : Dispositif expérimental pour l'usinage robotisé et l'acquisition des signaux : (a) vue de la cellule robotisée d'usinage ; (b) Disposition des capteurs d'émission acoustique.

Plusieurs paramètres caractéristiques des salves d'EA ont été extraits notamment l'amplitude maximale, l'énergie absolue du signal, la valeur quadratique moyenne (RMS), le nombre de coups par salve et la fréquence moyenne. Le dynamomètre a été utilisé pour mesurer les efforts

de coupe. Les composantes F_x (effort dans la direction d'avance), F_y (effort dans la direction normale) et F_z (effort hors plan d'usinage) ont été extraites des signaux enregistrés et l'effort total F_t a été calculé comme la norme du vecteur résultant.

Après l'usinage, les paramètres topographiques ont été mesurés à l'aide d'un appareil de mesure 3D surfacique MarSurf CM mobile. Sur chaque éprouvette, la rugosité a été mesurée sur deux zones de $11 \times 11 \text{ mm}^2$ de la surface usinée, soit au total 216 mesures effectuées. L'indicateur d'état de surface utilisé par la suite est la hauteur moyenne arithmétique S_a , couramment utilisée dans la littérature.

Résultats

Effet de l'orientation du fil sur l'état de surface

Les résultats montrent un effet significatif de l'orientation du fil sur le paramètre S_a d'état de surface, en particulier au-delà de 90° , correspondant à un usinage perpendiculaire au fil (Fig. 2). En usinage dans le sens du fil, i.e. de 0° à 60° , de bons états de surface ont été obtenus, avec une rugosité faible et relativement stable : S_a varie modérément entre $10 \mu\text{m}$ et $30 \mu\text{m}$. En usinage perpendiculaire au fil ($\approx 90^\circ$), une légère augmentation par rapport au sens du fil a été observée, mais la qualité obtenue reste globalement bonne. En revanche, lorsque la coupe s'effectue en contrefil, des arrachements sont générés, ce qui se traduit par une augmentation significative de la rugosité aux orientations 120° et 150° , avec une dispersion plus élevée.

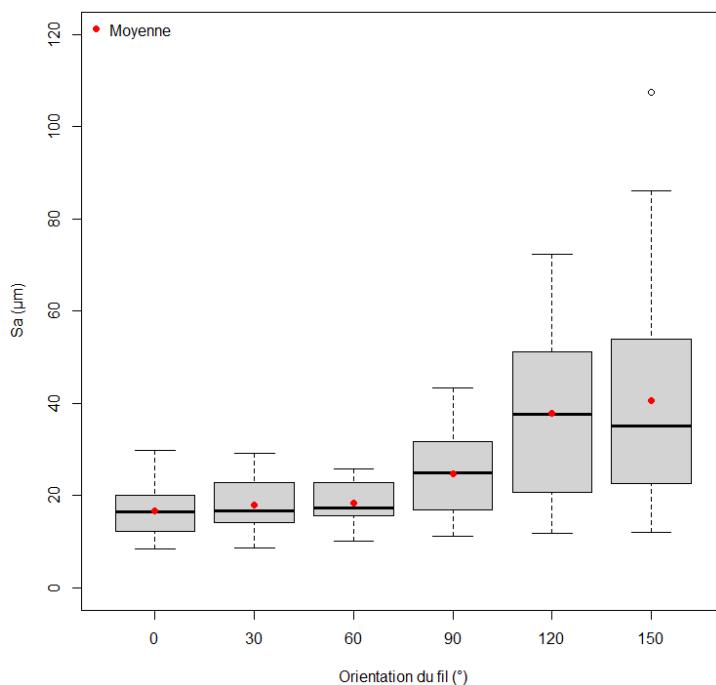


Fig 2 : Effet de l'orientation du fil sur S_a

Ces résultats sont conformes à ceux de la littérature, qui montrent que la variation de la rugosité reste modérée dans le sens du fil et perpendiculairement au fil, et qu'elle augmente au-delà de l'orientation de 90° , avec un maximum de rugosité généralement observé entre 120° et 165° , selon les études (Cyra et Tanaka 2000, Iskra et Hernandez 2009, Iskra et Tanaka 2005).

Relation entre S_a , l'effort de coupe total et les paramètres d'émission acoustique

Les résultats obtenus montrent des corrélations contrastées entre les variables mesurées sur le paramètre S_a d'état de surface en usinage robotisé du bois. La corrélation entre S_a et l'effort total de coupe F_t reste modéré avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.38$ et une dispersion

importante aux efforts élevés (Fig. 3). Ces résultats montrent que les efforts ne peuvent donc pas être utilisés seuls pour estimer les états de surface produits en cours d'usinage.

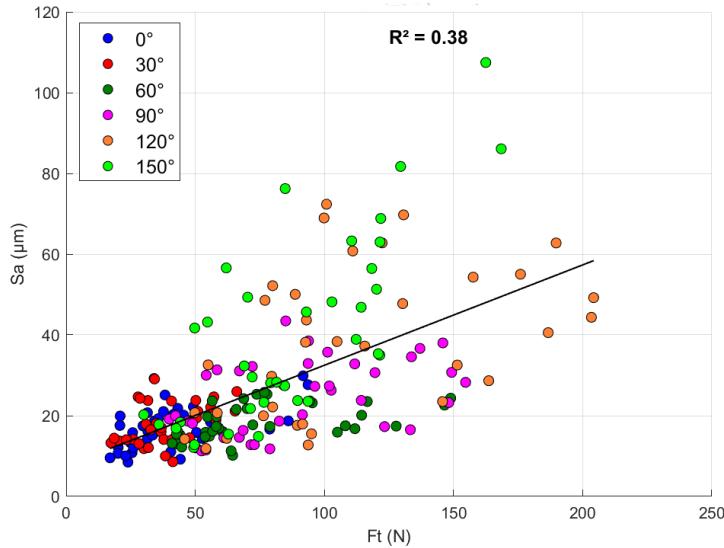


Fig 3 : Relation entre Sa et l'effort total de coupe à différentes orientations du fil

En revanche, le paramètre RMS issu du signal d'émission acoustique présente une meilleure corrélation avec Sa ($R^2 = 0.61$) ainsi qu'une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 9.83 μm , traduisant une évolution plus cohérente de la rugosité avec l'intensité des événements acoustiques (Fig. 4).

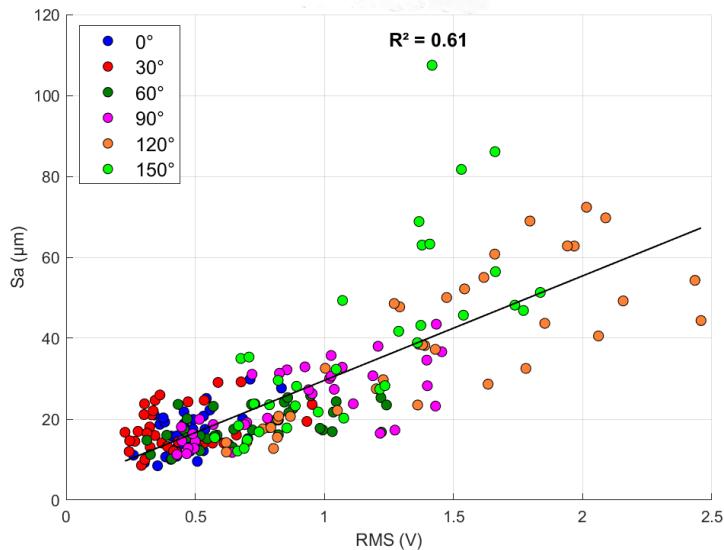


Fig 4 : Relation entre Sa et RMS d'émission acoustique à différentes orientations du fil

Ces résultats montrent que, dans notre contexte, afin de surveiller la rugosité à différentes orientations du fil, les paramètres d'émission acoustique, notamment le RMS, apparaissent comme de meilleurs indicateurs que les efforts de coupe. Néanmoins, l'utilisation unique de cet indicateur reste également insuffisante pour envisager d'estimer précisément les états de surface générés.

Conclusion et perspectives

Les résultats ont montré que l'état de surface du bois varie fortement selon l'orientation du fil. Le paramètre RMS d'émission acoustique est mieux corrélé à Sa que l'effort total de coupe, ce qui indique qu'il est plus pertinent, si on ne devait utiliser qu'un seul indicateur, pour surveiller

la qualité de surface dans notre contexte. Ces premiers résultats offrent des perspectives intéressantes. Dans la suite de ce travail, les relations entre la rugosité, les paramètres de coupe et les signaux d'émission acoustique seront approfondies. Un modèle prédictif de la rugosité, à différentes orientations du fil, sera élaboré par régression linéaire multiple (MLR). La démarche retenue consistera à sélectionner au préalable les variables explicatives les plus pertinentes, à contrôler leurs interdépendances, puis à comparer plusieurs formulations de modèles afin de retenir un modèle interprétable et doté d'un pouvoir prédictif élevé. Ce modèle permettra ensuite de proposer une stratégie de ponçage robotisé, basée sur la cartographie des états de surface estimés au cours des opérations d'usinage.

Remerciements

Nous souhaitons remercier l'agglomération de Tarbes Lourdes Pyrénées, l'IUT de Tarbes et la Région Occitanie pour leur support financier.

Références

- Aguilera A, Barros JL (2012) Surface roughness assessment on medium density fibreboard rip sawing using acoustic signals. *Eur J Wood Prod* 70(3):369–372.
- Aguilera A, Vega M, Méausoone PJ (2007) Effects of grain angle on the amplitudes of acoustic emission and surface roughness in wood machining. *Wood Sci Technol* 41(5):373–381.
- Curti R, Marcon B, Denaud L, Collet R (2018) Effect of grain direction on cutting forces and chip geometry during green beech wood machining. *BioRes* 13(3):5491–5503.
- Cyra G, Tanaka C (2000) The effects of wood-fiber directions on acoustic emission in routing. *Wood Sci Technol* 34(3):237–252.
- Derbas M, Jaquemod A, Frömel-Frybort S, Güzel K, Moehring H-C, Riegler M (2024) A machine learning approach to predict properties of wood products during milling. *Forest Prod J* 74:1–8. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-24-00012>
- Diez Cifuentes E, Alzugaray Franz R, Padilla Bernedo A, Leal Muñoz E, Madaf M, Sanhueza Carvajal P, Gonzalez Salazar J (2023) Robotized workstation for intelligent sanding processes of wooden workpieces. *DYNAII* 98(3):362–368.
- Goli G, Curti R, Marcon B, Scippa A, Campatelli G, Furferi R, Denaud L (2018) Specific cutting forces of isotropic and orthotropic engineered wood products by round shape machining. *Materials* 11(12):2575.
- Goli G, Sandak J (2016) Proposal of a new method for the rapid assessment of wood machinability and cutting tool performance in peripheral milling. *Eur J Wood Prod* 74(6):867–874.
- International Federation of Robotics (2024) Sample World Robotics – table shipments by industry 2008 to 2018 in France. <https://ifr.org/wr-industrial-robots>
- Iskra P, Hernandez RE (2009) The influence of cutting parameters on the surface quality of routed paper birch and surface roughness prediction modeling. *Wood Fiber Sci* 41(1):28–37.
- Iskra P, Tanaka C (2005) The influence of wood fiber direction, feed rate, and cutting width on sound intensity during routing. *Holz Roh Werkst* 63(2):167–172.