



HAL
open science

Caractérisation quantitative des fibres non coupées lors du détournement de composites UD-GFRP

Benoît Schrab, Anne Collaine, Alban Foulonneau, Michel Tournalonias

► **To cite this version:**

Benoît Schrab, Anne Collaine, Alban Foulonneau, Michel Tournalonias. Caractérisation quantitative des fibres non coupées lors du détournement de composites UD-GFRP. JNC23: Journées Nationales sur les Composites 2023, AMAC, UFC, Supmicrotech-ENSMM, CNRS, Jul 2023, Besançon, France. hal-04606769

HAL Id: hal-04606769

<https://hal.science/hal-04606769v1>

Submitted on 10 Jun 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.

Caractérisation quantitative des fibres non coupées lors du détourage de composites UD-GFRP

Quantitative characterisation of uncut fibres during trimming of UD-GFRP composites

Benoît Schrab¹, Anne Collaine¹, Alban Foulonneau², Michel Tournalonias¹

1 : Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles
Université de Haute-Alsace
11 rue Alfred Werner - 68093 Mulhouse Cedex
e-mail : benoit.schrab@uha.fr – anne.collaine@uha.fr – michel.tournalonias@uha.fr

2 : Institut de Recherche en Informatique, Mathématiques, Automatique et Signal
Université de Haute-Alsace
12 rue des Frères Lumière - 68093 Mulhouse Cedex
e-mail : alban.foulonneau@uha.fr

Résumé

Les opérations d'usinage réalisées sur les composites à renfort fibreux sont susceptibles de générer différents types de défauts sur les surfaces usinées, notamment l'apparition de fibres non coupées. La caractérisation de ce type de défauts est importante, car ils peuvent constituer des amorces de défauts plus critiques, entraver l'assemblage des pièces et nécessiter des opérations supplémentaires d'ébavurage. Dans cette communication, un dispositif de caractérisation quantitative semi-automatique des fibres non coupées après détourage est présenté. Ce dispositif est ensuite mis en œuvre pour la caractérisation des fibres non coupées après détourage à différentes orientations de fibres de composites UD-GFRP. Les résultats obtenus sont par la suite corrélés avec les efforts de coupe et les vibrations pendant usinage.

Abstract

Machining operations performed on fibre-reinforced composites are likely to generate various types of defects on the machined surfaces, especially the occurrence of uncut fibres. The characterisation of this type of defects is important, because they can lead to more critical defects, hinder the assembly of the parts and require additional deburring operations. In this paper, a device for semi-automatic quantitative characterisation of uncut fibres after trimming is presented. This device is then implemented for the characterisation of uncut fibres after trimming at different fibre orientations of UD-GFRP composites. The results obtained are then correlated with the cutting forces and vibrations during machining.

Mots Clés : détourage, GFRP, fibres non coupées, quantification

Keywords : trimming, GFRP, uncut fibres, quantification

1. Introduction

Les matériaux composites, en particulier les polymères renforcés de fibres (FRP), connaissent une utilisation toujours croissante dans des secteurs de plus en plus divers. La fabrication de pièces de qualité nécessite généralement des opérations de parachèvement après mise en forme. Ces opérations permettent de retirer l'excédent de matière et de respecter les exigences dimensionnelles requises, ou d'obtenir des géométries non réalisables par le procédé de mise en forme [1]. Le détourage et le perçage sont les principales opérations de parachèvement utilisées [2].

La nature hétérogène des composites à renfort fibreux engendre des mécanismes de coupe spécifiques, qui peuvent entraîner l'apparition de défauts sur les surfaces usinées (délaminage, fibres non coupées, étalement de matrice...). Les fibres non coupées (Fig. 1), en particulier, peuvent constituer des amorces de défauts plus importants [3]. Plusieurs auteurs ont notamment montré que l'apparition de fibres non coupées après usinage est en lien avec la présence de délaminage [4], [5].

De plus, les fibres non coupées peuvent également entraver l'assemblage des pièces et nécessiter des opérations supplémentaires d'ébavurage [3]. C'est pourquoi, l'étude et la caractérisation des fibres non coupées après usinage est importante, en vue de qualifier la coupe réalisée.

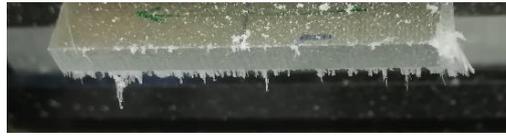


Fig. 1. Fibres non coupées après détournage d'un composite UD-GFRP

Parmi les paramètres influents sur l'apparition de fibres non coupées, l'angle entre le vecteur vitesse de coupe et la direction des fibres joue un rôle prépondérant [6]. L'apparition de fibres non coupées dépend également de la géométrie de l'outil et de son état d'usure [5], [6], [7]. Par ailleurs, ce type de défauts est principalement observé sur les plis extérieurs de la pièce usinée, du fait que ces plis ne sont maintenus que sur une face [6], [8], [9].

Pour décrire plus finement ces différents aspects, il devient nécessaire de définir des paramètres quantifiables et de mettre en place des méthodes adaptées pour les évaluer. De tels paramètres ont déjà été établis pour la caractérisation du délaminage, avec notamment la définition en perçage d'un facteur de délaminage [10], très largement utilisé dans la littérature et décliné par la suite en de nombreuses variantes [11]. Un critère similaire peut être défini en rainurage [12]. En ce qui concerne les fibres non coupées, de nombreux critères ont également été proposés en perçage [3]. En fraisage, on peut notamment citer les travaux de Hosokawa *et al.* [13], qui définissent une longueur moyenne de fibres non coupées et Pereszlay *et al.* [14], qui utilisent entre autres paramètres l'aire de matériau non coupé (fibres émergentes et résidus de matrice) et la longueur maximale de matériau non coupé. Ces paramètres peuvent être déterminés par différentes méthodes, notamment le traitement numérique d'images acquises par méthode optique [13], [14], [15], [16], [17], [18]. L'acquisition et le traitement sont toutefois généralement séparés, le traitement pouvant faire appel à plusieurs logiciels successifs, ce qui rend le processus de caractérisation long et fastidieux.

La présente étude vise à caractériser de façon quantitative la présence de fibres non coupées sur les plis extérieurs de composites UD-GFRP (polymères renforcés de fibres de verre unidirectionnelles) après détournage, en fonction des caractéristiques du matériau (en particulier l'orientation des fibres), des caractéristiques de l'outil (géométrie et état d'usure) et des conditions de coupe. De plus, l'objectif est de corréliser ces résultats avec l'évolution d'autres paramètres en lien avec la qualité de la coupe, tels que le niveau vibratoire et les efforts de coupe pendant usinage ou l'état de surface après usinage. Un dispositif de caractérisation semi-automatique a été développé, permettant de réaliser à la fois l'acquisition et le traitement des images avec un minimum d'opérations manuelles. De plus, il permet d'analyser séparément les fibres non coupées sur les plis inférieur et supérieur de la pièce usinée. Ce dispositif a ensuite été mis en œuvre pour la caractérisation des fibres non coupées en fonction de l'orientation des fibres dans le matériau.

2. Dispositif de caractérisation des fibres non coupées

Le dispositif de caractérisation des fibres non coupées (Fig. 2) a été développé en collaboration avec l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud Alsace (*ENSISA*) de Mulhouse. L'éprouvette à caractériser est placée sur une plaque munie de butées réglables. Ces butées permettent un positionnement latéral rapide de l'éprouvette et peuvent être réglées en fonction de la largeur de celle-ci. Les images sont acquises par une caméra *Triton TRI050S-PC*, avec un capteur de résolution 3,45 $\mu\text{m}/\text{pixel}$. Elle est équipée d'un objectif télécentrique *Opto Engineering TC23024* de grossissement 0,35. Ce type d'objectifs conserve la perspective, garde un grossissement constant sur

toute la profondeur de champ et engendre une faible distorsion de l'image, ce qui les rend particulièrement adaptés pour des applications de mesure.

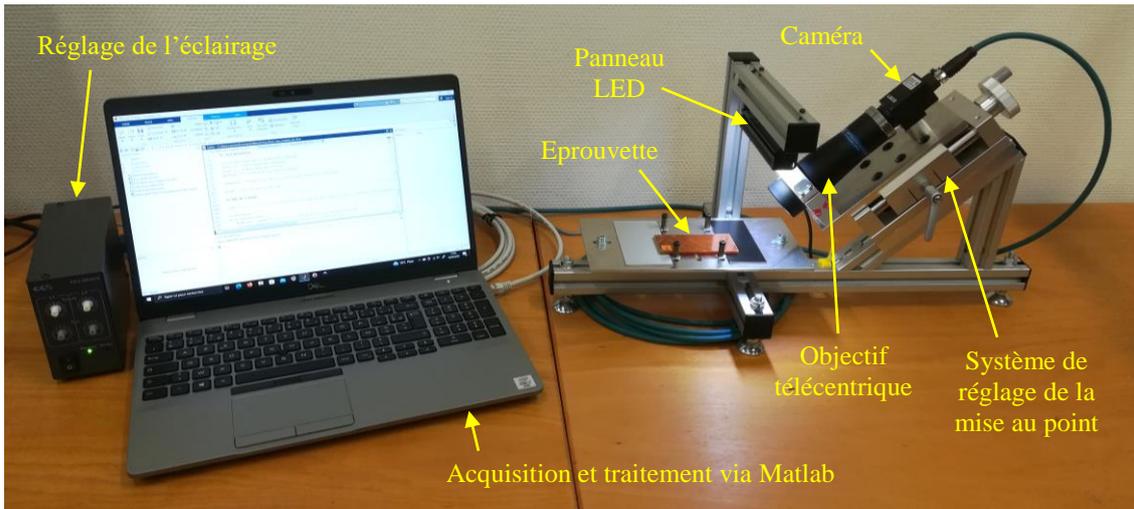


Fig. 2. Vue d'ensemble du dispositif de caractérisation des fibres non coupées

La caméra est positionnée à un angle $\alpha = 45^\circ$ par rapport à la plaque supportant l'éprouvette (Fig. 3). Ce choix de positionnement permet d'imager de façon séparée les fibres émergentes des arêtes supérieure et inférieure de la tranche usinée. Les fibres caractérisées sont celles situées sur l'arête inférieure et il est donc nécessaire de retourner manuellement l'éprouvette pour caractériser l'autre arête. La caméra et son objectif sont montés sur un dispositif de translation permettant d'effectuer la mise au point. Ce réglage est défini au départ et il n'est plus nécessaire de le modifier par la suite. L'ensemble de la zone imagée est éclairée de manière uniforme par un panneau LED d'intensité réglable.

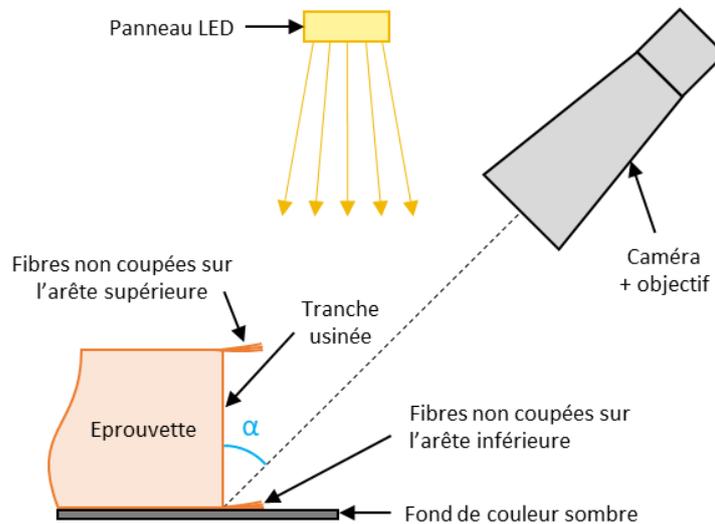


Fig. 3. Schéma du dispositif d'acquisition des images

L'acquisition et le traitement des images sont pilotés par un code *Matlab* dont les principales étapes sont présentées sur la Fig. 4. Après acquisition, les images sont segmentées en 3 classes (1 : fond, 2 : tranche usinée, 3 : fibres émergentes) par la méthode d'Otsu [19], déjà utilisée par d'autres auteurs [16], [20]. Cette étape de segmentation permet de séparer les fibres émergentes du fond mais est également utilisée par l'algorithme de détection automatique de la tranche (transformée de Hough [21]).

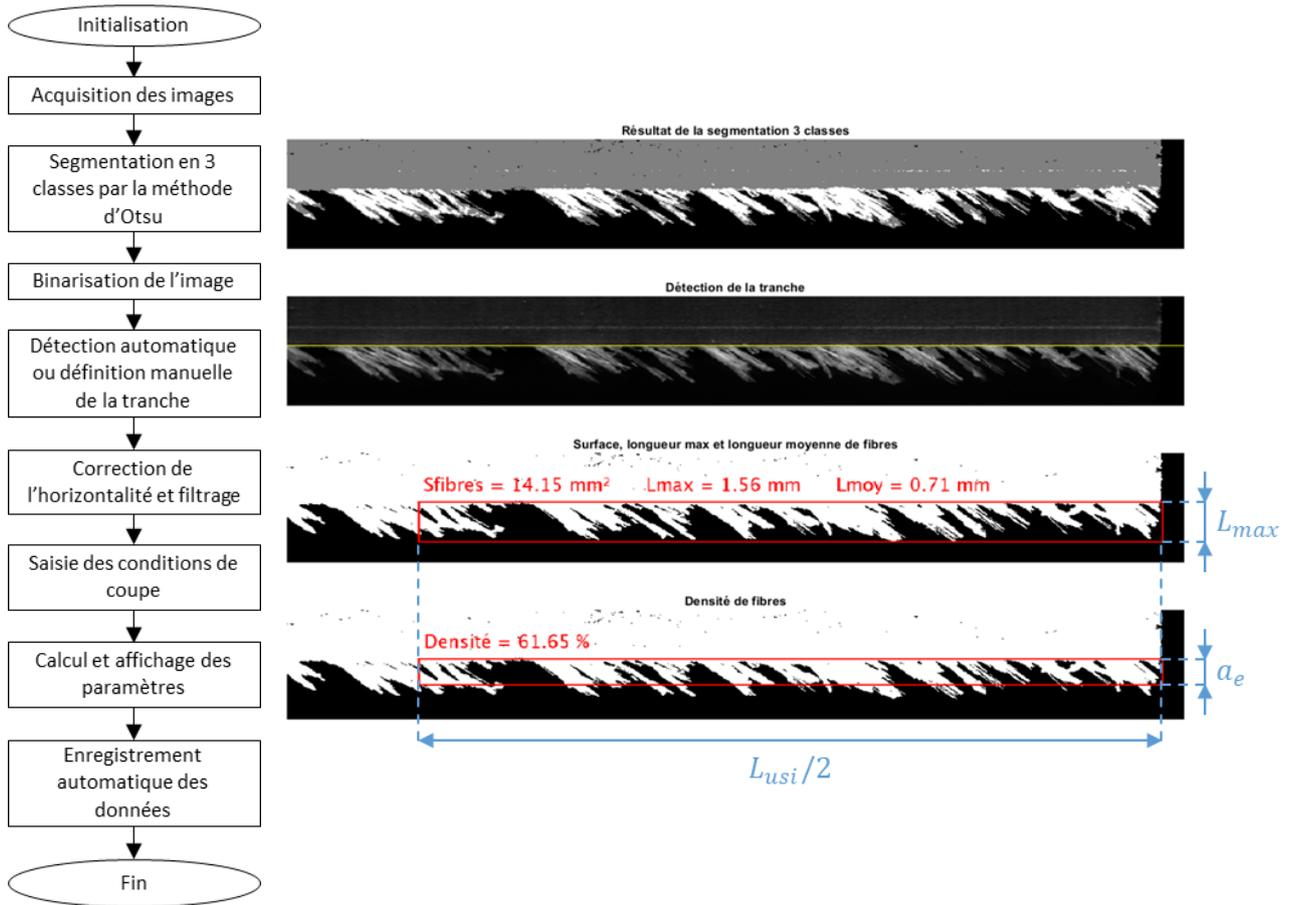


Fig. 4. Organigramme de traitement et interface d'affichage des résultats

L'extraction des fibres est réalisée à partir des classes 1 et 3, tandis que la détection de la tranche utilise les classes 1 et 2 en cas de faible densité de fibres ou 2 et 3 en cas de forte densité de fibres. L'horizontalité de la tranche sur l'image est vérifiée et ajustée si nécessaire. L'image est également filtrée, afin de retirer d'éventuels résidus ou poussières indésirables sur le fond. La zone imagée étant relativement limitée, plusieurs acquisitions peuvent être nécessaires pour caractériser la totalité de la longueur usinée L_{usi} . Pour cette étude, les éprouvettes sont caractérisées en deux fois sur une longueur $L_{usi}/2$ (partie droite comme sur la Fig. 4 puis partie gauche). Quatre paramètres basés sur les travaux présentés en introduction et permettant de caractériser les fibres en termes de densité et de longueur sont déterminés :

- la surface de fibres non coupées : S_{fibres} ;
- la longueur maximale projetée de fibres non coupées : L_{max} ;
- la longueur moyenne projetée de fibres non coupées : $L_{moy} = \frac{S_{fibres}}{L_{usi}/2}$;
- la densité de fibres dans une zone de hauteur égale à l'engagement radial de l'outil a_e lors de la passe étudiée : $D_{fibres} = \frac{S_{f-d}}{S_{tot-d}}$, avec S_{f-d} la surface de fibres dans la zone de calcul de la densité et S_{tot-d} la surface totale de cette zone.

3. Caractérisation des fibres non coupées après détournage de composites UD-GFRP

On se propose ici de mettre en œuvre le moyen de mesure développé, afin de caractériser les fibres non coupées après détournage de composites UD-GFRP. Les essais de détournage sont réalisés à différentes orientations de fibres et à conditions de coupe constantes.

3.1 Eprouvettes

Pour les besoins de l'étude, un stratifié UD-GFRP a été fabriqué à partir de préimprégnés *HexPly 913/28%/192/EC9756* (verre E/époxy) fournis par la société *Hexcel*. Le stratifié a été fabriqué sous presse avec un cycle de température choisi sur la base des recommandations du fournisseur. Les principales caractéristiques du matériau obtenu sont données dans le Tab. 1.

Nombre de plis	24
Epaisseur [mm]	3,15
Température de transition vitreuse Tg onset (DMA – 5°C/min – 1Hz – 15µm) [°C]	126,24
Taux volumique de fibres [%]	61,86
Module de flexion longitudinal [GPa]	42,3
Module de flexion transversal [GPa]	13,3

Tab. 1. Principales caractéristiques du matériau utilisé

Les échantillons destinés à être usinés (90*40 mm²) ont été découpés dans le stratifié à l'aide d'une scie sur table équipée d'un disque abrasif, de manière à obtenir différentes orientations de fibres. Pour cette étude, les orientations Ψ choisies par rapport à la direction d'usinage (Fig. 5) sont 0°, 45°, 90° et 135°.

3.2 Essais de détournement

Les essais de détournement sont réalisés sur une fraiseuse trois axes *Charly 2U* de puissance à la broche 1,1 kW. Les outils utilisés sont des fraises carbure monobloc multi-dents à taille diamant revêtues *SECO 871060.0-DURA*, de diamètre 6 mm et comportant 10 arêtes de coupe périphériques (Fig. 6). L'échantillon est positionné latéralement grâce à une cale dédiée (en bleu sur la Fig. 5) et la longueur de porte-à-faux est réglée à 15,5 mm au moyen d'une cale amovible (non représentée). L'échantillon est ensuite maintenu en position par une bride serrée de manière équilibrée à 3 N.m.

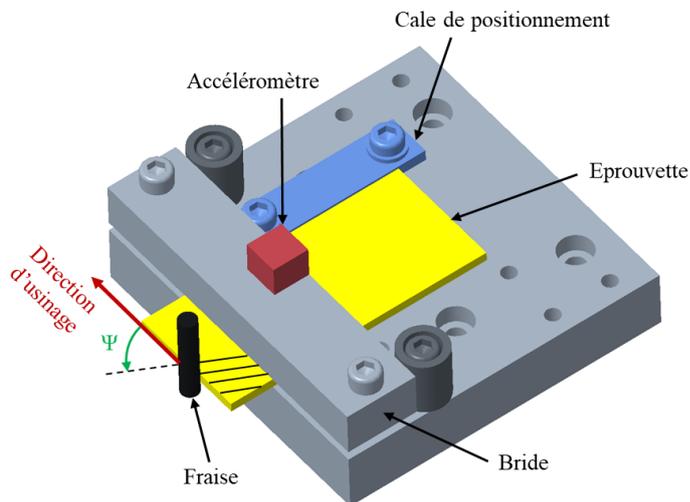


Fig. 5. Principe de l'opération de détournement



Fig. 6. Outil utilisé pour les essais de détournement

Quatre essais de détournement (un essai par orientation de fibres) sont réalisés en avançant suivant une trajectoire rectiligne parallèle à la face avant du système de bridage, avec un dépassement d'outil constant fixé à 2 mm par rapport à la face inférieure de l'éprouvette. Les conditions de coupe choisies sont données dans le Tab. 2.

Vitesse de coupe [m/min]	115
Avance par dent [mm/dt]	0,012
Profondeur de passe [mm]	3,15
Engagement radial [mm]	0,5

Tab. 2. Conditions de coupe pour le détournage

Pour chaque essai, deux passes d'usinage sont effectuées. La première consiste à effleurer la matière avec une fraise dédiée (*SECO 871060.0*). Ceci permet de garantir un engagement radial identique sur tous les essais pour la deuxième passe. Celle-ci est effectuée avec un outil neuf pour chaque orientation usinée. Les efforts de coupe sont mesurés au cours de chaque usinage grâce à une platine de mesure d'efforts *Kistler 9129AA* positionnée sous le système de bridage représenté sur la Fig. 5. Le niveau vibratoire est également mesuré par un accéléromètre *Brüel & Kjaer 4535-B* positionné sur la bride, au niveau de l'axe de symétrie de l'éprouvette. Dans cette étude, seuls les efforts axiaux exercés par l'outil sur l'éprouvette sont analysés, car ils sont liés à l'apparition de délaminage et de fibres non coupées sur les plis extérieurs des pièces usinées [22]. Le niveau vibratoire est étudié dans la même direction.

3.3 Résultats expérimentaux

Les évolutions de la surface de fibres non coupées et de la longueur maximale de fibres non coupées en fonction de l'orientation des fibres sont présentées sur les Fig. 7 et Fig. 8 pour les arêtes supérieure et inférieure de la tranche usinée. La densité et la longueur moyenne de fibres non coupées ne sont pas représentées, car les tendances sont les mêmes que pour la surface de fibres.

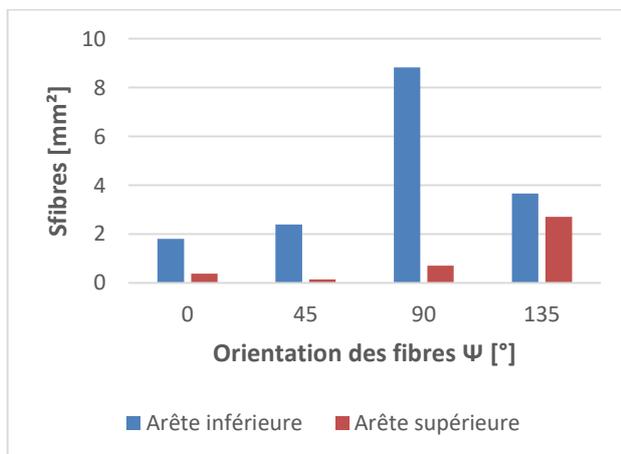


Fig. 7. Surface de fibres non coupées en fonction de l'orientation des fibres

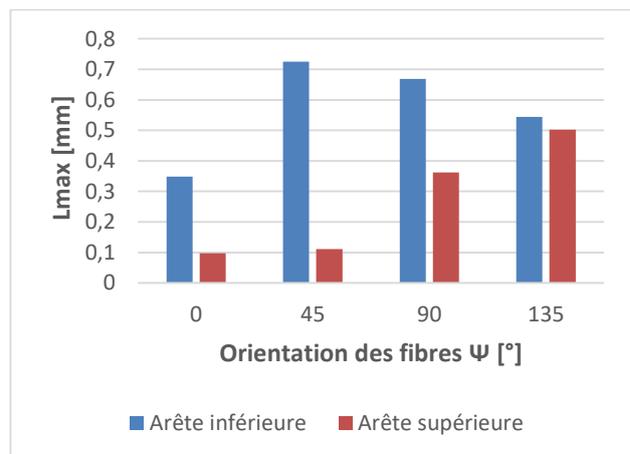


Fig. 8. Longueur maximale de fibres non coupées en fonction de l'orientation des fibres

On constate que la surface de fibres et leur longueur maximale sont plus importantes sur l'arête inférieure de la surface usinée. Ce comportement peut être expliqué par la géométrie de l'outil utilisé, qui engendre sur l'éprouvette des efforts axiaux dirigés vers le bas pendant la coupe, favorisant ainsi le décollement des plis inférieurs du matériau.

Sur l'arête inférieure de la tranche usinée, la surface de fibres est la plus importante pour un usinage à 90° et la plus faible pour un usinage à 0°. Sur l'arête supérieure de la tranche, la surface de fibres est cette fois-ci la plus importante pour un usinage à 135° et la plus faible pour un usinage à 45°. Il est toutefois à noter que les très faibles valeurs sont peu représentatives et qu'une variabilité notable des caractéristiques des fibres est observée pour les usinages à 0°. Ces résultats sont cependant cohérents avec ce qui a été observé qualitativement par Hintze *et al.* [6]. La longueur maximale de

fibres sur l'arête supérieure suit la même tendance que la surface de fibres. Elle est maximale pour un usinage à 135° et minimale pour un usinage à 0° . La tendance est différente sur l'arête inférieure, où la longueur maximale est obtenue pour un usinage à 45° et la longueur minimale pour un usinage à 0° .

Les valeurs RMS (Root Mean Square) de l'effort de coupe axial en fonction de l'orientation des fibres sont représentées sur la Fig. 9. Ces valeurs ont été déterminées en excluant les zones d'entrée et de sortie de l'outil dans la matière et après un filtrage passe-bas à une fréquence de coupe de 150 Hz. Elles représentent les effets quasi statiques et les effets dynamiques liés à la rotation de l'outil (102 Hz). De la même manière, les valeurs RMS du niveau vibratoire axial sont représentées sur la Fig. 10. Cette fois-ci, les signaux sont filtrés à une fréquence de coupe de 1500 Hz, afin d'inclure les effets dynamiques liés au passage de dent (1020 Hz).

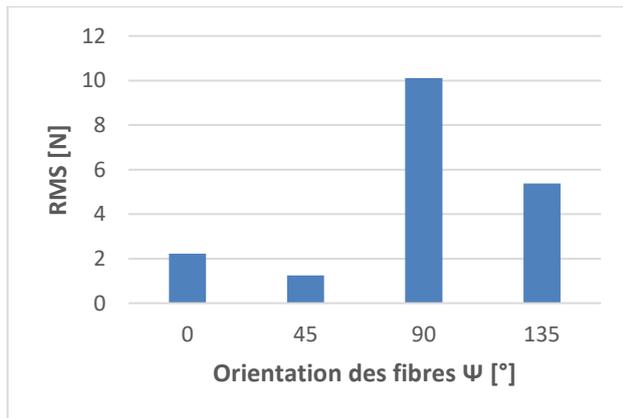


Fig. 9. Effort de coupe axial en fonction de l'orientation des fibres

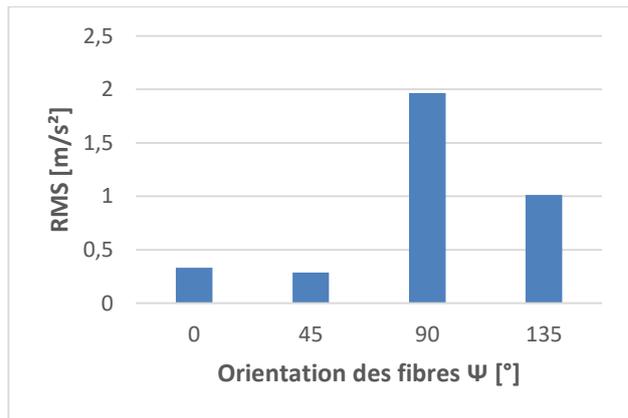


Fig. 10. Niveau vibratoire axial en fonction de l'orientation des fibres

Ces résultats montrent que l'évolution de l'effort et du niveau vibratoire axial en fonction de l'orientation des fibres suit la même tendance que le paramètre S_{fibres} pour l'arête inférieure. Ainsi, des efforts et un niveau vibratoire élevés pendant la coupe tendent à générer des fibres non coupées.

4. Conclusion et perspectives

Dans cette communication, un dispositif semi-automatique de caractérisation des fibres non coupées après détournage de composites à renfort fibreux a été présenté. Ce dispositif permet de déterminer la surface, la longueur maximale et la longueur moyenne de fibres non coupées ainsi que la densité de fibres non coupées dans une zone correspondant à l'engagement radial de l'outil. Le dispositif développé a été mis en œuvre pour caractériser les fibres non coupées après détournage de composites UD-GFRP. Les résultats quantitatifs ont pu être corrélés avec les observations qualitatives mentionnées dans la littérature ainsi qu'avec les efforts de coupe et les vibrations pendant usinage.

Le dispositif développé offre de nombreuses perspectives. Au-delà de l'influence de l'orientation des fibres, l'impact de l'usure de l'outil, de sa géométrie et des conditions de coupe sont les principaux axes de travail envisagés pour la suite. La poursuite de cette étude permettra par ailleurs de valider la reproductibilité sur des longueurs usinées plus importantes des résultats préliminaires présentés ici. D'autres paramètres quantifiables que ceux actuellement déterminés pourront également être ajoutés, afin de proposer une caractérisation plus complète des fibres non coupées.

Remerciements

Nous adressons nos remerciements à la société *Hexcel* qui nous a gracieusement fourni la matière première nécessaire pour cette étude ainsi qu'au Laboratoire de Photochimie et d'Ingénierie Macromoléculaires (*LPIM*) de Mulhouse pour sa contribution à la caractérisation des composites fabriqués.

Références

- [1] J. Sheikh-Ahmad, *Machining of Polymer Composites*. Springer, 2009. doi: 10.1007/978-0-387-68619-6.
- [2] A. Caillaud, M. Ritou, S. Garnier, et B. Furet, « Choix de procédés de parachèvement pour les pièces en matériaux composites », présenté à JNC 16, Toulouse, France: AMAC, juin 2009.
- [3] D. I. Poór, N. Geier, C. Pereszlai, et J. Xu, « A critical review of the drilling of CFRP composites: Burr formation, characterisation and challenges », *Composites Part B: Engineering*, vol. 223, oct. 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109155.
- [4] W. Hintze et D. Hartmann, « Modeling of delamination during milling of unidirectional CFRP », *Procedia CIRP*, vol. 8, p. 444-449, 2013, doi: 10.1016/j.procir.2013.06.131.
- [5] R. Voss, L. Seeholzer, F. Kuster, et K. Wegener, « Influence of fibre orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP », *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 18, p. 75-91, août 2017, doi: 10.1016/j.cirpj.2016.10.002.
- [6] W. Hintze, D. Hartmann, et C. Schütte, « Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) – An experimental study », *Composites Science and Technology*, vol. 71, p. 1719-1726, oct. 2011, doi: 10.1016/j.compscitech.2011.08.002.
- [7] J. Y. Sheikh-Ahmad, M. Dhuttargaon, et H. Cheraghi, « New tool life criterion for delamination free milling of CFRP », *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 92, p. 2131-2143, mars 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0240-2.
- [8] K. Colligan et M. Ramulu, « The effect of edge trimming on composite surface plies », *Manufacturing Review*, vol. 5, n° 4, p. 274-283, janv. 1992.
- [9] J. Sheikh-Ahmad, N. Urban, et H. Cheraghi, « Machining damage in edge trimming of CFRP », *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 27, p. 802-808, 2012, doi: 10.1080/10426914.2011.648253.
- [10] W.-C. Chen, « Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 37, n° 8, p. 1097-1108, août 1997, doi: 10.1016/S0890-6955(96)00095-8.
- [11] P. Patel et V. Chaudhary, « Delamination evaluation in drilling of composite materials – A review », *Materials Today: Proceedings*, vol. 56, p. 2690-2695, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.267.
- [12] M. K. N. Khairussihma, A. K. N. Aqella, et I. S. S. Sharifah, « Optimization of Milling Carbon Fibre Reinforced Plastic Using RSM », *Procedia Engineering*, vol. 184, p. 518-528, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.122.
- [13] A. Hosokawa, N. Hirose, T. Ueda, et T. Furumoto, « High-quality machining of CFRP with high helix end mill », *CIRP Annals*, vol. 63, n° 1, p. 89-92, 2014, doi: 10.1016/j.cirp.2014.03.084.
- [14] C. Pereszlai, N. Geier, et D. Poór, « Influence of fixturing setup on quality of edge trimmed UD-CFRP », présenté à International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2019, Belgrade, Serbie, sept. 2019, p. 106-109.
- [15] N. Geier, T. Szalay, et I. Biró, « Trochoid milling of carbon fibre-reinforced plastics (CFRP) », in *Procedia CIRP*, Budapest, Hongrie, 2018, p. 375-378. doi: 10.1016/j.procir.2018.09.039.
- [16] F. Wang, J. Yin, Z. Jia, B. Niu, et W. Liu, « A novel approach to evaluate the delamination extent after edge trimming of carbon-fiber-reinforced composites », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 232, n° 14, p. 2523-2532, 2018, doi: 10.1177/0954405417699015.
- [17] N. Karabibene, J.-F. Chatelain, Y. Beauchamp, et G. Lebrun, « Effect of machining parameters on the uncut fibers of a unidirectional flax fiber reinforced composite », *The Journal of Management and Engineering Integration*, vol. 11, n° 1, p. 54-63, 2018.
- [18] M. D. Navarro-Mas, M. D. Meseguer, J. Lluch-Cerezo, et J. A. García-Manrique, « Comparison of Different Parameters to Evaluate Delamination in Edge Trimming of Basalt Fiber Reinforced Plastics (BFRP) », *Materials*, vol. 13, n° 23, 2020, doi: 10.3390/ma13235326.
- [19] N. Otsu, « A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms », *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, n° 1, p. 62-66, janv. 1979, doi: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
- [20] N. Geier, G. Póka, Á. Jacsó, et C. Pereszlai, « A method to predict drilling-induced burr occurrence in chopped carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites based on digital image processing », *Composites Part B: Engineering*, vol. 242, août 2022, doi: 10.1016/j.compositesb.2022.110054.
- [21] P. V. C. Hough, « Method and means for recognizing complex patterns », US3069654A, 18 décembre 1962.
- [22] M. D. Navarro-Mas, J. A. García-Manrique, M. D. Meseguer, I. Ordeig, et A. I. Sánchez, « Delamination Study in Edge Trimming of Basalt Fiber Reinforced Plastics (BFRP) », *Materials*, vol. 11, n° 8, août 2018, doi: 10.3390/ma11081418.