



HAL
open science

Influence de l'orientation des fibres sur la qualité du détournement d'éprouvettes UD-GFRP

Anne Collaine, Benoit Schrab, Anthony Chassignet, Jean Marie Freyburger, Alban Foulonneau, Pierre Jean Lapray, Catherine Jordan, Michel Turlonias

► **To cite this version:**

Anne Collaine, Benoit Schrab, Anthony Chassignet, Jean Marie Freyburger, Alban Foulonneau, et al.. Influence de l'orientation des fibres sur la qualité du détournement d'éprouvettes UD-GFRP. 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-04281715

HAL Id: hal-04281715

<https://hal.science/hal-04281715>

Submitted on 13 Nov 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.

Influence de l'orientation des fibres sur la qualité du détourage d'éprouvettes UD-GFRP

A. COLLAINE^a, B. SCHRAB^a, A. CHASSIGNET^b, J.M. FREYBURGER^a,
A. FOULONNEAU^b, P.J. LAPRAY^b, C. JORDAN^a, M. TOURLONIAS^a

a. Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles, UHA, Mulhouse, France

b. Institut de Recherche en Informatique, Mathématiques, Automatique et Signal, UHA,
Mulhouse, France

Contact : anne.collaine@uha.fr

Résumé :

Cette communication a pour objectif d'étudier l'influence de l'angle d'orientation des fibres sur quelques critères caractérisant l'usinage des composites. L'étude a été menée dans le cas du détourage d'éprouvettes à renfort unidirectionnel en fibres de verre. L'ensemble des paramètres est constant à l'exception de l'angle d'orientation des fibres. Son influence est observée en regard des vibrations et de la qualité de la surface détourée. A cet effet, quatre critères de comparaison sont retenus : la valeur RMS (Root Mean Square) des vibrations (accélération au cours du temps), l'aspect visuel de la surface détourée, la présence de fibres non coupées aux arêtes inférieure et supérieure de la surface usinée ainsi que la rugosité de la surface détourée. Les résultats obtenus pour ces quatre critères en fonction des valeurs d'angle d'orientation des fibres sont comparés afin de dégager les premières tendances. La communication se termine par la proposition d'un moyen optique de caractérisation des fibres non coupées.

Abstract :

This communication aims to study the links between fibre orientation and some criteria of the composite cutting process. This study concerns the trimming of unidirectional glass fibre composite parts. All cutting parameters are constant except the fibre orientation angle. The influence of the fibre orientation angle is analysed in relation to vibrations and surface quality. Four criteria are used for the analysis: the RMS value (Root Mean Square value) of the acceleration over time, the appearance of the milled surface, the presence of uncut fibres at the lower and upper edges of the surface and the roughness of the milled surface. The results obtained for these four criteria according to the values of the fibre orientation angle are compared to identify the first trends. We finish this communication by proposing a new optical system that will allow to characterise uncut fibres.

Mots clefs : GFRP, usinage, fibres non coupées, méthodes optiques

1 Introduction

La réalisation de pièces en composites impose régulièrement des opérations de parachèvement. Ces opérations ont pour but de finaliser la géométrie (ajout de trous, poches...) ou encore d'assurer la précision dimensionnelle (maîtrise du bord de pièce). Le détournage est l'un des procédés d'usinage répondant à cette problématique. Lors d'une opération d'usinage, différents défauts peuvent être observés, tels que du délaminage, de l'arrachement de fibres ou des écaillages [1], [2], [3], [4]. Il est également possible d'observer des fibres non coupées aux bords de coupe, essentiellement le long des arêtes inférieure ou supérieure des pièces, qui sont caractéristiques d'une mauvaise coupe. Ainsi, la qualité de la surface peut être très variable. Ces différents défauts peuvent avoir plusieurs causes, dont l'existence de vibrations trop importantes [5]. L'usinage des matériaux composites est particulièrement propice à générer l'apparition de vibrations du fait de pièces usinées plutôt minces et élancées [6] et de par la nature hétérogène du matériau.

Différents paramètres peuvent avoir une influence sur l'apparition des défauts et des vibrations. Ainsi, on peut citer les paramètres de coupe, le système de bridage de la pièce, le choix des trajectoires d'usinage, la géométrie et les matériaux des outils, l'état d'usure des outils et la constitution du composite lui-même (en particulier la nature des constituants et l'organisation spatiale du renfort) [4], [5], [7]. Parmi les paramètres ayant une influence importante sur la coupe des composites, l'orientation des fibres est largement citée [1], [2], [8], [9], [10], [11]. Il a été montré, en particulier dans le cadre de la coupe orthogonale, que la formation du copeau et par conséquent la qualité de la surface sont fortement liées à l'orientation des fibres. De même, l'orientation des fibres a une forte influence sur les efforts liés à la coupe.

Dans cette communication, nous nous proposons d'étudier l'influence de l'orientation des fibres sur les vibrations intervenant lors de l'usinage et sur la qualité de la coupe. Le travail sera mené dans le cas du détournage de composites UD-GFRP. Après avoir brièvement décrit les conditions expérimentales, nous présenterons les résultats liant orientation des fibres et vibrations puis ceux liant orientation des fibres et qualité de surface à travers l'observation de la surface et du bord de coupe et la mesure d'état de surface. Nous effectuerons ensuite une analyse comparative des résultats. Pour terminer, nous proposerons un nouveau moyen d'analyse du bord de coupe visant à caractériser les fibres non coupées.

2 Conditions expérimentales

L'étude est menée sur des composites Glass Fiber Reinforced Plastics (GFRP) à renfort unidirectionnel (UD). Les plaques composites sont réalisées par enroulement filamenteux d'un multifilament de verre préalablement imprégné dans un bain de résine époxy. Après mise sous presse et polymérisation, les plaques obtenues sont découpées afin d'obtenir les éprouvettes utilisées lors de l'usinage. Celles-ci ont une section d'environ $40 \times 3,5 \text{ mm}^2$ et ont une longueur de l'ordre de 100 mm [12], [13].

Ces éprouvettes sont détournées sur une fraiseuse 3 axes Charly 2U. Elles sont maintenues par pincement entre deux brides. Le détournage est réalisé suivant une trajectoire parallèle au système de bridage, sur toute l'épaisseur de l'éprouvette. Ainsi, la profondeur de passe a_p est constante et égale à l'épaisseur de l'éprouvette et le porte-à-faux entre la surface usinée et les brides est constant. Le détournage est réalisé au moyen d'une fraise carbure monobloc revêtue, dédiée à l'usinage des composites. Les paramètres de coupe sont constants et choisis selon les prescriptions du constructeur d'outils. Les caractéristiques de l'outil et les conditions de coupe utilisées dans cette étude sont récapitulées dans le Tableau 1.


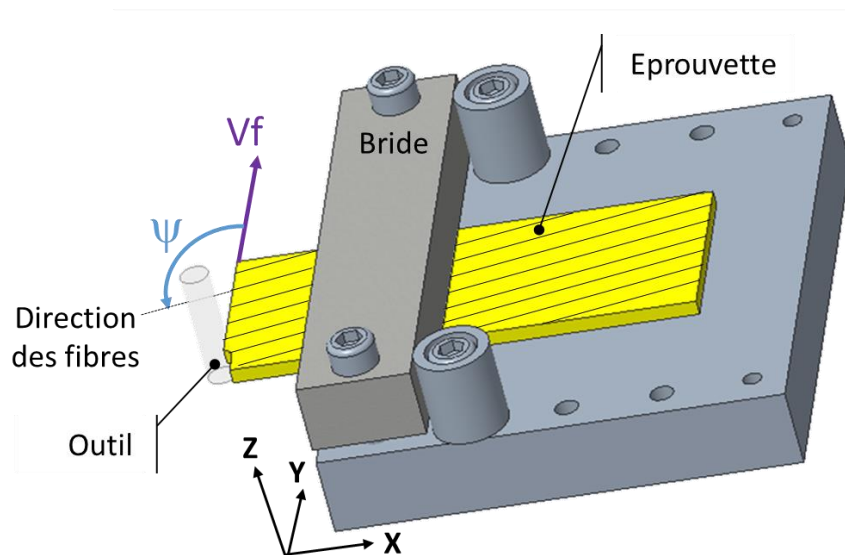
Géométrie de l'outil	Diamètre 6 mm, double hélice, 4 dents 
Vitesse de coupe (m.min⁻¹)	150
Avance par dent (mm.dent⁻¹)	0,048
Engagement radial a_e (mm)	1
Profondeur de passe a_p (mm)	3,5

Tableau 1 : outil et conditions de coupe

L'angle d'orientation des fibres est défini comme l'angle entre la direction de la vitesse d'avance V_f et la direction des fibres, de façon analogue à la définition de Wang *et al.* [11] en coupe orthogonale. Nous noterons cet angle ψ (Figure 1).

Figure 1 : manipulation de détourage et angle d'orientation des fibres ψ

Quatre valeurs de l'angle d'orientation des fibres ψ ont été étudiées : 0° , 45° , 90° et 135° . 0° correspond à un usinage parallèlement aux fibres, tandis que 90° correspond à un usinage perpendiculairement aux fibres.

3 Influence de l'angle d'orientation des fibres

Les différents essais présentés ci-après ont été réalisés au moins 3 fois. Sur chaque graphique, les points représentés sont les moyennes des mesures effectuées pour les différents essais et les barres d'erreur correspondent à plus ou moins une fois l'écart-type.

3.1 Vibrations générées lors de l'usinage

Les vibrations générées lors de l'usinage sont enregistrées en utilisant la procédure établie lors d'une précédente étude [13]. Ainsi, un accéléromètre mono-axe est collé sur la face supérieure de l'éprouvette. Il enregistre l'accélération (en $m.s^{-2}$), perpendiculairement à la surface de collage de l'accéléromètre. Ceci nous donne une image de l'amplitude vibratoire de l'éprouvette suivant l'axe Z (parallèlement à la surface détournée). La valeur RMS (Root Mean Square value) est ensuite déterminée sur la base des données enregistrées durant l'usinage, en prenant soin de retirer les zones d'entrée et de sortie pour lesquelles l'engagement a_e n'est pas constant. L'équation donnant la valeur RMS est la suivante : $RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2}$ où N représente le nombre de points enregistrés sur la zone étudiée et Si les échantillons temporels du signal d'accélération.

Les résultats obtenus sont représentés sur la Figure 2.

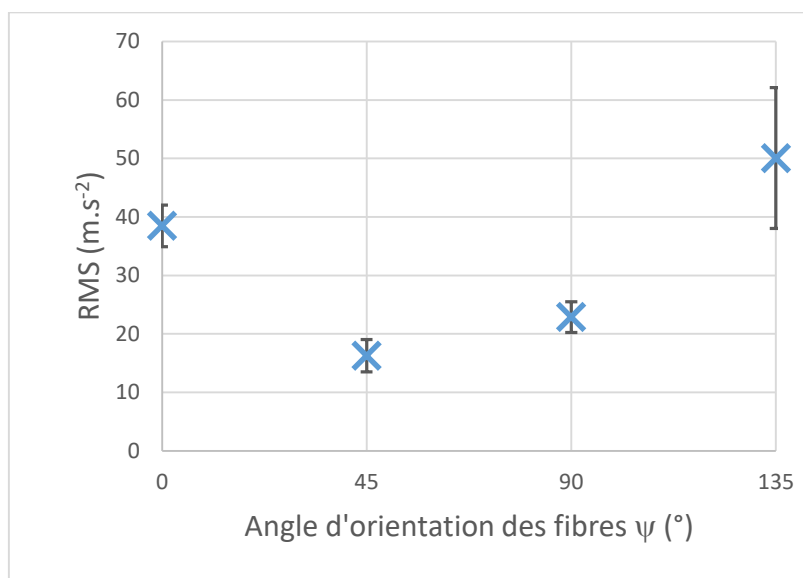


Figure 2 : influence de l'orientation des fibres sur les vibrations

Ce graphique fait apparaître que l'angle d'orientation des fibres a une influence importante sur les vibrations générées pendant l'usinage. Les valeurs RMS les plus élevées sont observées pour un angle d'orientation des fibres de 135° . Les valeurs les plus faibles sont obtenues pour l'angle de 45° . Ces tendances sont similaires à celles observées dans le cas de la mesure des efforts de coupe en détournage d'UD-CFRP par Sheikh-Ahmad [3]. Il faut noter que, dans cet ouvrage, les composantes d'effort sont dans le plan XY tandis que nous mesurons les vibrations suivant Z, donc perpendiculairement à ce plan. Le lien entre efforts et vibrations n'est par conséquent pas immédiat. Toutefois, l'auteur montre une certaine fluctuation des composantes d'efforts au cours du temps, en particulier pour $\psi = 135^\circ$. Ces variations font que les efforts engendrés dans le plan XY sont susceptibles de générer des vibrations dans le sens perpendiculaire. Par ailleurs, l'outil que nous utilisons pour le détournage présente un angle d'hélice non nul. Cela rend la composante axiale d'effort sans doute moins négligeable que dans le cas traité par Sheikh-Ahmad [3]. Ceci est par conséquent probablement source de vibrations suivant Z.

3.2 Analyse de la qualité du détourage

- **Analyse qualitative**

La qualité du détourage a d'abord été analysée de manière qualitative par l'observation visuelle de la surface détournée. Cette observation a été faite à l'aide d'une loupe binoculaire (grossissement *16). Pour chaque angle d'orientation des fibres, un exemple caractéristique des images obtenues est donné en Figure 3.

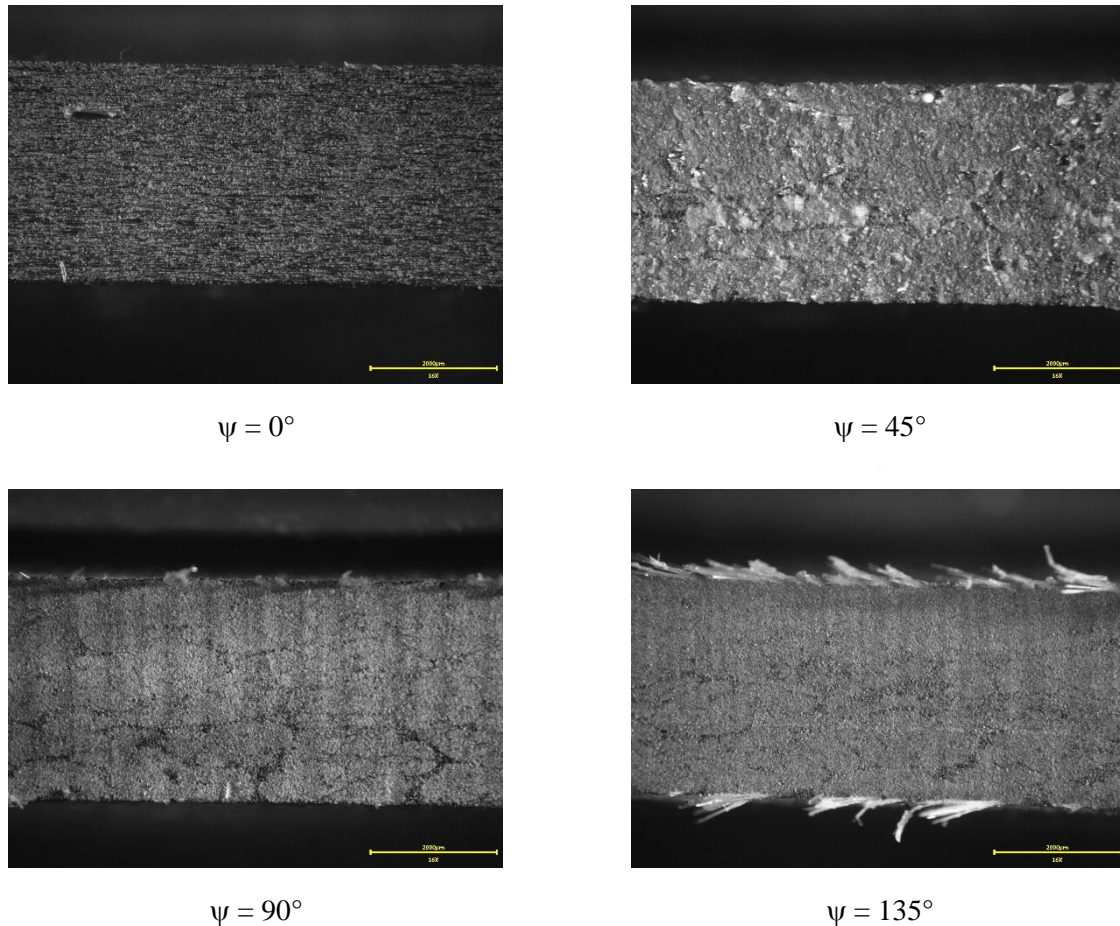


Figure 3 : images des faces usinées en fonction de l'angle d'orientation des fibres ψ

Ces images montrent que l'aspect de la surface détournée et la présence ou non de fibres non coupées dépendent de l'angle d'orientation des fibres. Les fibres non coupées sont observées aux arêtes inférieure et supérieure de la surface usinée.

Concernant l'aspect de la surface détournée, la surface la plus lisse est obtenue pour l'angle $\psi = 0^\circ$. Pour $\psi = 90^\circ$ et $\psi = 135^\circ$, nous observons des stries significatives de vibrations qui sont liées à l'outil. C'est pour $\psi = 45^\circ$ que la surface semble être la moins lisse. Elle apparaît notablement plus dégradée que pour les autres orientations et semble même présenter des résidus de matière usinée.

Les fibres non coupées aux arêtes inférieure et supérieure sont observées pour les angles $\psi = 90^\circ$ et $\psi = 135^\circ$, 135° étant l'angle pour lequel il y en a le plus. Ces résultats sont à mettre en parallèle de ceux observés par Hagino et Inoue [14] et par Hintze *et al.* [2]. Hagino et Inoue travaillent sur le détournage de composites CFRP. Ils observent la présence de fibres non coupées dans deux cas : celui de l'usinage d'éprouvettes UD-CFRP avec un angle d'orientation des fibres de 90° et celui de l'usinage d'éprouvettes présentant un renfort avec des fibres à 45° et 135° . Hintze *et al.*, quant à eux, observent l'influence de l'orientation des fibres sur la présence de fibres non coupées lors d'une opération de rainurage d'un composite UD-CFRP. Pour ce faire, en complément de l'angle d'orientation des fibres, ils définissent l'angle de coupe des fibres Θ comme l'angle entre la direction des fibres et la direction de la vitesse de coupe. D'après les auteurs, l'apparition de délaminage et de fibres non coupées n'est observée que pour des angles Θ compris entre 90° et 180° (zone dite critique). Dans notre situation d'usinage, quand $\psi = 135^\circ$, l'angle Θ varie entre $\Theta_e = 86,8^\circ$ et $\Theta_s = 135^\circ$ (Figure 4). Ceci correspond au cas identifié comme critique par Hintze *et al.* et justifie ainsi la présence importante de fibres non coupées.

Une autre justification de ces résultats réside peut-être dans les phénomènes de coupe. En coupe orthogonale, Wang *et al.* ont montré que les phénomènes diffèrent en fonction de l'orientation des fibres [11]. Il serait intéressant d'étudier ces phénomènes dans le cas du détournage pour voir si des mécanismes différents peuvent justifier la présence de fibres non coupées. Par ailleurs, ce phénomène est sans doute amplifié dans notre cas du fait que l'arête de coupe est inclinée (angle d'hélice non nul). En effet, ce dernier est cité comme ayant une forte influence sur la qualité de la coupe [14], [15].

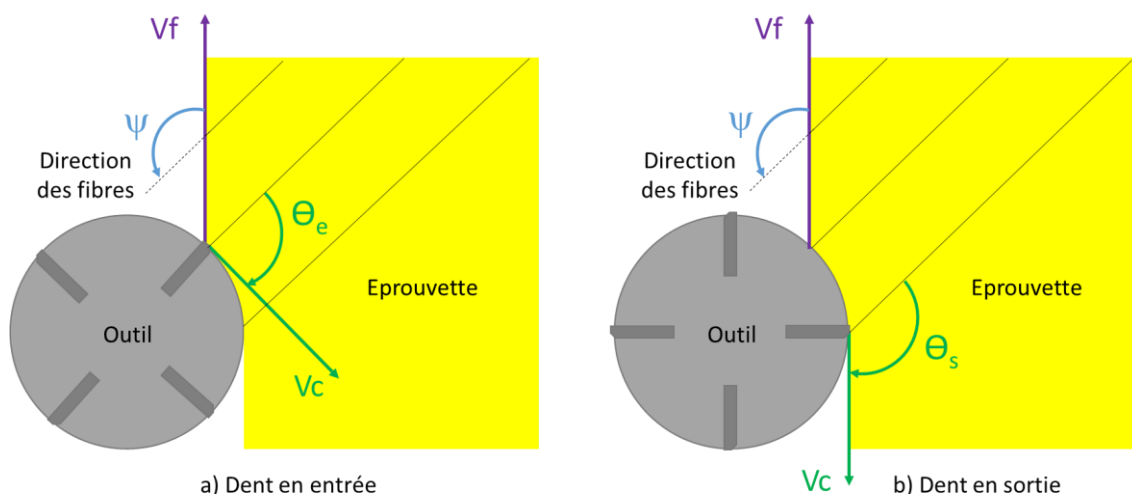


Figure 4 : angle de coupe des fibres Θ en entrée et sortie d'usinage

- **Mesure de la rugosité**

Nous avons complété l'observation qualitative de la surface par la mesure de la rugosité. Ces mesures ont été réalisées par un rugosimètre linéique. Pour chaque surface, les mesures ont été effectuées suivant la direction d'avance, en 3 endroits différents et une moyenne a été faite. Comme pour la mesure de vibration, pour une valeur d'angle d'orientation des fibres, chaque essai a été réalisé plusieurs fois. Les paramètres R_t , R_a et R_z , seuls paramètres proposés par notre moyen de mesure, ont été relevés. Les tendances étant les mêmes pour ces trois paramètres, seuls les résultats concernant R_z sont proposés ci-après, ce paramètre étant par ailleurs indiqué comme le plus représentatif des paramètres linéiques de rugosité dans la caractérisation des surfaces fraisées de pièces composite [16]. Les résultats obtenus sont représentés sur la Figure 5.

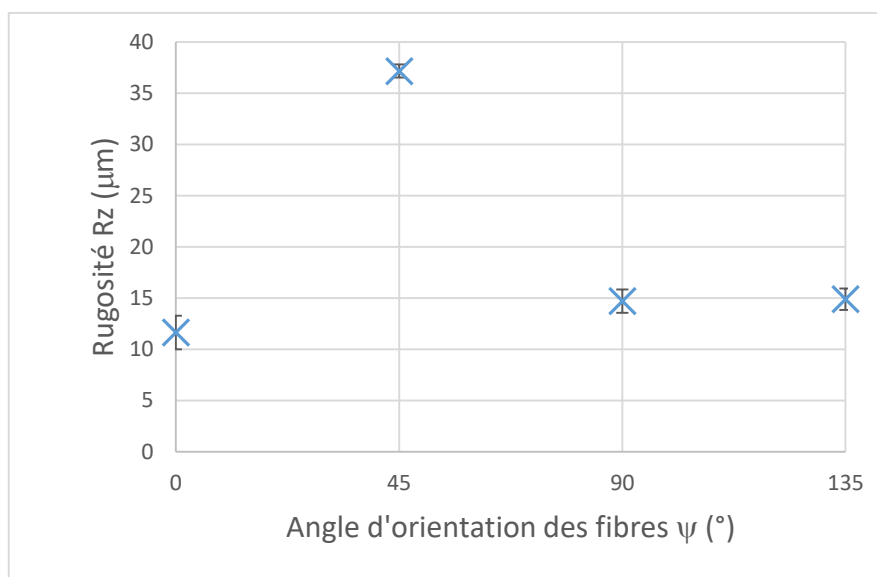


Figure 5 : influence de l'orientation des fibres sur la rugosité Rz

Ces résultats confirment les observations faites à la loupe binoculaire, à savoir que la moins bonne qualité de surface est obtenue pour un angle $\psi = 45^\circ$. Pour les trois autres angles, les valeurs de rugosité sont très largement inférieures et relativement comparables. L'observation de stries faite précédemment pour les angles $\psi = 90^\circ$ et $\psi = 135^\circ$ aurait pu laisser supposer qu'on obtiendrait des rugosités élevées mais ce n'est pas le cas. L'évolution de la valeur de rugosité en fonction de l'angle d'orientation des fibres suit une tendance quasi contraire à celle observée par Wang *et al.* dans [1]. Dans cette publication étudiant la coupe orthogonale, les auteurs ont obtenu les valeurs de rugosité les plus élevées pour des angles entre 120° et 150° . Ces résultats sont nuancés en fonction de la profondeur de passe. Une autre étude de la coupe orthogonale d'UD-CFRP permet d'observer que les plus petites valeurs de rugosité sont mesurées pour un angle de 0° [17]. Cette même étude obtient pour les autres angles d'orientation des fibres des valeurs de rugosité variables en fonction de la géométrie de l'outil utilisé (angle de coupe et angle de dépouille), même si c'est souvent l'angle d'orientation des fibres le plus grand (150°) qui donne la rugosité la plus élevée. Toujours en coupe orthogonale mais cette fois sur des UD-GFRP, Kahwash *et al.* [9] obtiennent les rugosités les plus élevées pour un angle d'orientation des fibres de 135° . Leur étude se limite à l'analyse des angles 0° , 90° et 135° (valeurs retranscrites avec notre définition d'angle d'orientation). Enfin, dans le cas du détournage de composites CFRP [14], les auteurs rapportent que la rugosité la plus faible est obtenue pour un angle d'orientation des fibres de 90° , tandis que les moins bons résultats sont mesurés pour un matériau présentant des fibres à 45° et 135° , ces résultats étant par ailleurs étudiés au regard de l'angle d'hélice de l'outil, celui-ci ayant également une forte influence sur les résultats.

Ces quelques études et nos travaux donnent des résultats parfois contradictoires. Il est bien difficile de faire des parallèles, les matériaux et les procédés n'étant pas les mêmes. De plus caractériser la qualité de surface d'un composite par une rugosité linéique n'est pas forcément le plus représentatif de la qualité elle-même, du fait de la nature anisotrope du matériau [18].

3.3 Comparaison des différents résultats

Pour terminer notre travail d'analyse nous avons synthétisé les différents résultats sur le diagramme en araignée ci-dessous (Figure 6). Pour chacun des critères étudiés, une note de 1 à 4 a été attribuée pour chaque valeur d'angle d'orientation de fibres. 4 représente une « bonne note » tandis que 1 représente une « mauvaise note ». Ainsi pour le critère « vibrations », la note de 4 a été attribuée à l'angle donnant la valeur RMS la plus faible à savoir 45° , 3 pour la 2^{ème} valeur la plus faible (à savoir 90°), etc.

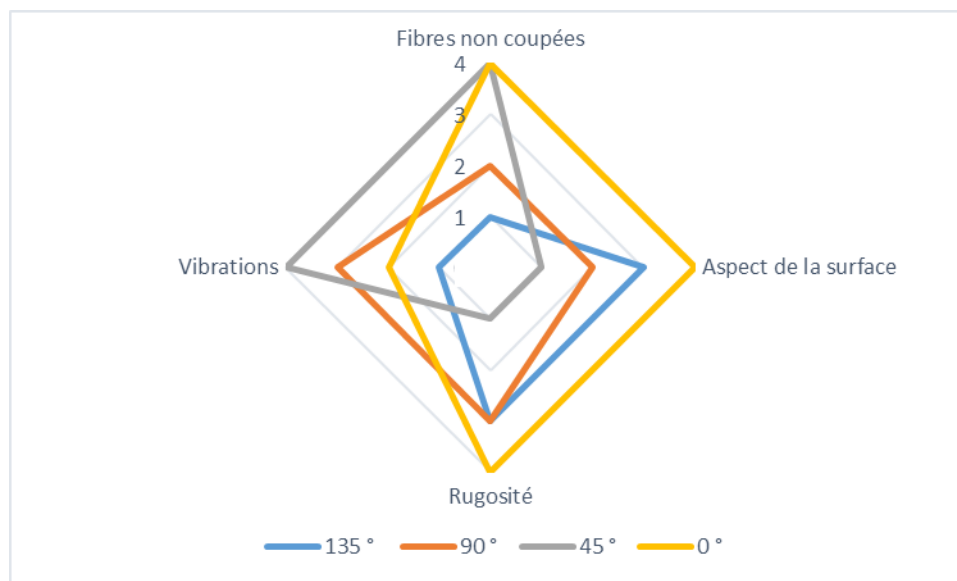


Figure 6 : diagramme comparatif des critères observés

Ce diagramme montre que les critères « aspect de la surface » et « rugosité » sont assez liés. De la même manière, fibres non coupées et vibrations sont en partie liées puisque le meilleur et le moins bon résultat sont observés pour le même angle d'orientation des fibres. Toutefois, une tendance unique n'apparaît pas. Par exemple, « vibrations » et « rugosité » n'évoluent pas suivant la même tendance. Même si les vibrations sont mesurées suivant l'axe Z, nous aurions pu nous attendre à observer une évolution analogue à la qualité de surface. Ceci traduit la complexité des phénomènes intervenant dans l'usinage des composites, complexité liée aux spécificités de ces matériaux.

4 Conclusion et perspectives : vers un nouveau moyen de caractérisation des fibres non coupées

Cette étude préliminaire a permis de montrer que l'angle d'orientation des fibres a une incidence importante sur les vibrations générées lors de l'usinage et sur la qualité de la surface détournée. Ainsi, dans le cadre du détournage de composites UD-GFRP, nous avons montré qu'un angle d'orientation des fibres égal à 135° engendre davantage de vibrations et de fibres non coupées, tandis qu'un mauvais état de surface a été mesuré pour un angle de 45° .

Les essais réalisés nous ont permis de dégager des tendances. Pour mieux caractériser les phénomènes, il faudrait pouvoir analyser plus en détail la qualité du détournement. La mesure de rugosité sur un profil linéaire tel que nous l'avons mise en œuvre est un critère simple mais qui n'est pas forcément pertinent dans le cas de l'usinage des composites du fait de l'hétérogénéité et de l'anisotropie du matériau. Remplacer cette mesure par une caractérisation de rugosité surfacique serait sans doute plus pertinent. De plus, une analyse des détériorations subies par le composite (en particulier le délaminage) compléterait la caractérisation de la coupe. Nous avons à notre disposition des moyens de caractérisation de la rugosité surfacique ou du délaminage. Cependant, ils ne sont pas forcément faciles à mettre en œuvre car ils nécessitent de ne prendre qu'une partie de l'éprouvette ou d'effectuer des réglages longs et fastidieux pour chaque mesure. Le problème est analogue pour la caractérisation des fibres non coupées. Les mesures de longueurs et d'angles sont possibles via les images obtenues au moyen de la loupe binoculaire. Toutefois, ces mesures sont longues et fastidieuses et nécessitent pour chaque éprouvette des réglages manuels spécifiques. De plus, ces mesures non automatisées, ne permettent pas de quantifier la présence de fibres non coupées.

Pour toutes ces raisons, nous avons entamé la conception d'un nouveau moyen optique de caractérisation des fibres non coupées. Ce nouveau moyen est basé sur l'imagerie polarimétrique, technique adaptée à l'identification des propriétés de surface [19]. L'objectif de ce nouveau moyen est multiple : réaliser la caractérisation de fibres non coupées directement à proximité de la manipulation d'usinage ; traiter le plus automatiquement possible l'ensemble de l'éprouvette en un minimum de temps et en limitant le nombre de réglages ; caractériser de manière quantitative les fibres non coupées en donnant des valeurs représentatives de la densité de ces fibres.

Références :

- [1] X. M. Wang et L. C. Zhang, « An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, n° 10, p. 1015-1022, août 2003, doi: 10.1016/S0890-6955(03)00090-7.
- [2] 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, 10 2011, doi: 10.1016/j.compscitech.2011.08.002.
- [3] J. Sheikh-Ahmad, *Machining of Polymer Composites*. Springer, 2009. doi: 10.1007/978-0-387-68619-6.
- [4] 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.
- [5] H. Chibane, R. Serra, A. Morandea, A. Bouchou, et R. Leroy, « Détection d'un défaut de délaminage dans l'usinage d'un matériau composite par analyse vibratoire », présenté à 3ème colloque Analyse vibratoire expérimentale, Blois, nov. 2012.
- [6] L. Arnaud, « Vibrations d'usinage - Comment les identifier et les limiter », *Ref: TIP153WEB - « Travail des matériaux - Assemblage »*, janv. 2019.
- [7] W. König, Ch. Wulf, P. Graß, et H. Willerscheid, « Machining of Fibre Reinforced Plastics », *CIRP Annals*, vol. 34, n° 2, p. 537-548, 1985, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60186-3.
- [8] 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.
- [9] F. Kahwash, I. Shyha, et A. Maheri, « Machining Unidirectional Composites using Single-Point Tools: Analysis of Cutting Forces, Chip Formation and Surface Integrity », *Procedia Engineering*, vol. 132, p. 569-576, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.534.

-
- [10] H. Hocheng, H. Y. Puw, et Y. Huang, « Preliminary study on milling of unidirectional carbon fibre-reinforced plastics », *Composites Manufacturing*, vol. 4, n° 2, p. 103-108, juin 1993, doi: 10.1016/0956-7143(93)90077-L.
- [11] D. H. Wang, M. Ramulu, et D. Arola, « Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 35, p. 1623-1638, janv. 1995, doi: 10.1016/0890-6955(95)00014-O.
- [12] A. Collaine *et al.*, « Mise en place d'une manipulation de mesure de vibrations lors de l'usinage par détournage de composites UD GFRP », présenté au 24^{ème} Congrès Français de Mécanique, Brest, 26-30 août 2019.
- [13] A. Collaine, J.-M. Freyburger, C. Jordan, et M. Turlonias, « Influence of cutting parameters on vibrations in trimming of a Glass Fiber Reinforced Polymer Composite plate », présenté à International Conference on Advanced Materials, Mechanics and Manufacturing, On line - Sfax - Tunisia, mars 2021.
- [14] M. Hagino et T. Inoue, « Effect of Carbon Fiber Orientation and Helix Angle on CFRP Cutting Characteristics by End-Milling », *International Journal of Automation Technology*, vol. 7, n° 3, p. 292-299, mai 2013, doi: 10.20965/ijat.2013.p0292.
- [15] 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.
- [16] M. Ramulu, C. W. Wern, et J. L. Garbini, « Effect of fibre direction on surface roughness measurements of machined graphite/epoxy composite », *Composites Manufacturing*, vol. 4, n° 1, p. 39-51, janv. 1993, doi: 10.1016/0956-7143(93)90015-Z.
- [17] R. Voß, M. Henerichs, F. Kuster, et K. Wegener, « Chip Root Analysis after Machining Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) at Different Fiber Orientations », *Procedia CIRP*, vol. 14, p. 217-222, janv. 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.03.013.
- [18] P. Ghidossi, M. El Mansori, et F. Pierron, « Edge machining effects on the failure of polymer matrix composite coupons », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, n° 7, p. 989-999, juill. 2004, doi: 10.1016/j.compositesa.2004.01.015.
- [19] O. Drbohlav et R. Sara, « Using polarization to determine intrinsic surface properties », in *Polarization and Color Techniques in Industrial Inspection*, sept. 1999, vol. 3826, p. 253-263. doi: 10.1117/12.364331.