



HAL
open science

Etude des efforts de coupe en détournage de composites UD-GFRP avec des outils multi-dents à taille diamant

Benoît Schrab, Anne Collaine, Jean-Marie Freyburger, Michel Turlonias

► To cite this version:

Benoît Schrab, Anne Collaine, Jean-Marie Freyburger, Michel Turlonias. Etude des efforts de coupe en détournage de composites UD-GFRP avec des outils multi-dents à taille diamant. Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, GRENOBLE, France. hal-04784362

HAL Id: hal-04784362

<https://hal.science/hal-04784362v1>

Submitted on 15 Nov 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.



Etude des efforts de coupe en détournage de composites UD-GFRP avec des outils multi-dents à taille diamant

Benoît SCHRAB^(a), Anne COLLAINÉ^(a), Jean-Marie FREYBURGER^(a), Michel TOURLONIAS^(a)

(a) Université de Haute-Alsace, Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles, 11 rue Alfred Werner – 68093 Mulhouse Cedex

Mail : benoit.schrab@uha.fr

Résumé : Après la mise en forme des pièces en polymères renforcés de fibres (FRP), des opérations de détournage sont généralement requises pour la finition des bords. Afin de limiter l'apparition de défauts sur les pièces usinées, des outils avec des géométries spécifiques ont été développés, notamment les fraises multi-dents à taille diamant. Les mécanismes de coupe des FRP dépendent de l'orientation des fibres et par conséquent l'optimisation d'une opération de fraisage est liée à la séquence d'empilement du matériau. Cette communication se focalise sur le détournage de composites unidirectionnels (UD) dans le but d'étudier la coupe pour des orientations de fibres sélectionnées à conditions de coupe constantes, alors que les études menées jusqu'à présent avec ce type d'outils considèrent essentiellement le cas de composites multidirectionnels (MD). L'usinage est ici analysé en termes d'efforts de coupe dans les trois directions de l'espace, par une approche globale basée sur les efforts moyens, ainsi qu'une approche locale à l'échelle de la dent. Les résultats obtenus montrent en particulier l'influence de l'orientation des fibres sur les efforts moyens, dont les tendances sont cohérentes avec la coupe orthogonale. De plus, l'approche locale met en évidence l'impact des mécanismes de coupe sur les effets dynamiques propres à la géométrie d'outil utilisée.

Mots clés : détournage, GFRP, efforts de coupe, outils multi-dents à taille diamant.

1 Introduction

Le processus de fabrication des pièces en polymères renforcés de fibres (FRP) comporte généralement des opérations d'usinage après l'étape de mise en forme. Ces opérations sont nécessaires pour retirer l'excédent de matière, garantir la précision dimensionnelle ou réaliser des géométries qu'il n'est pas possible d'obtenir par le procédé de mise en forme (Sheikh-Ahmad, 2009). Parmi les différents procédés d'usinage utilisés, cette étude se focalise sur l'usinage par outils coupants et plus spécifiquement sur les opérations de détourage qui constituent, avec le perçage, les opérations d'usinage les plus fréquentes (Caillaud et al., 2009).

L'usinage des FRP peut conduire à de nombreux problèmes de qualité sur les pièces usinées avec l'apparition de défauts spécifiques à ce type de matériaux. Il s'agit par exemple de fissures, d'arrachement de fibres ou de dégradation de la matrice sur les surfaces usinées (Nguyen-Dinh et al., 2018). Les efforts axiaux générés par la coupe peuvent aussi entraîner l'apparition de fibres non coupées et de délaminage sur les plis extérieurs des pièces (Nguyen-Dinh et al., 2018). De tels efforts axiaux sont notamment associés aux fraises hélicoïdales conventionnelles (Knap et al., 2022) et l'utilisation d'outils à géométrie spécifique est donc plus appropriée. Une solution pour limiter les efforts axiaux consiste à segmenter les arêtes de coupe avec des outils tels que les fraises multi-dents à taille diamant, qui sont constituées de multiples dents pyramidales. Ces outils sont abondamment utilisés dans l'industrie (Geier et al., 2023). Le fraisage des FRP avec ce type d'outils est aussi largement étudié dans la littérature, notamment pour l'optimisation des conditions de coupe (Gara et al., 2016 ; Haddad et al., 2014 ; Janardhan et al., 2006 ; Prakash et al., 2016 ; Sheikh-Ahmad et al., 2012 ; Sundi et al., 2020).

Ces travaux portent toutefois essentiellement sur des composites multidirectionnels (MD), or les mécanismes de coupe des FRP dépendent fortement de l'orientation des fibres pour une géométrie d'outil donnée (Wang et al., 1995). L'optimisation de la coupe de ces matériaux est par conséquent liée à leur séquence d'empilement. Il semble donc pertinent d'étudier la coupe de composites unidirectionnels (UD) avec ce type d'outils en vue par la suite d'optimiser les opérations de fraisage des composites MD. Plusieurs auteurs ont utilisé la coupe orthogonale pour étudier les mécanismes de coupe des UD-FRP. Sur la base de ces travaux, une classification a été proposée par Sheikh-Ahmad (Sheikh-Ahmad, 2009) avec cinq mécanismes de coupe différents : type I (délaminage), type II (flambage des fibres), types III et IV (coupe des fibres) et type V (macrorupture). Des mécanismes similaires ont également été proposés dans des travaux plus récents (Meng et al., 2020).

L'objectif de ce travail est d'étudier le détourage de composites UD avec des outils multi-dents à taille diamant. L'étude se focalise sur les efforts de coupe et l'analyse de la qualité de surface. Elle vise en particulier à dégager les spécificités propres à la géométrie d'outil utilisée tout en faisant le lien avec les mécanismes identifiés en coupe orthogonale par une analyse d'abord globale puis à l'échelle d'une dent. Les essais sont effectués sur des polymères renforcés de fibres de verre (GFRP), qui sont largement utilisés pour de nombreuses applications, mais dont l'usinage est peu étudié dans la littérature avec ce type d'outils par rapport aux polymères renforcés de fibres de carbone (CFRP).

2 Matériels et méthodes

2.1 Composites GFRP

Un stratifié UD-GFRP est fabriqué sous presse à partir de préimprégnés *HexPly 913/28%/192/EC9756* (renfort en fibres de verre E et matrice époxy). Ses principales caractéristiques sont données dans le Tableau 1. Une fois le composite fabriqué, celui-ci peut être considéré homogène dans l'épaisseur, le renfort étant unidirectionnel. Des éprouvettes de 90*40 mm² sont découpées dans ce stratifié pour obtenir les quatre orientations de fibres Ψ les plus classiquement utilisées : 0°, 45°, 90° et 135° (Figure 1).

Tableau 1 : caractéristiques du stratifié UD-GFRP

Nombre et épaisseur de « pli » (mm)	24*0,13
Epaisseur (mm)	3,15
Tg onset (DMA – 5 °C/min – 1 Hz – 15 μm) (°C)	126,2
Taux volumique de fibres (%)	61,9
Module de flexion longitudinal (GPa)	42,3
Module de flexion transversal (GPa)	13,3

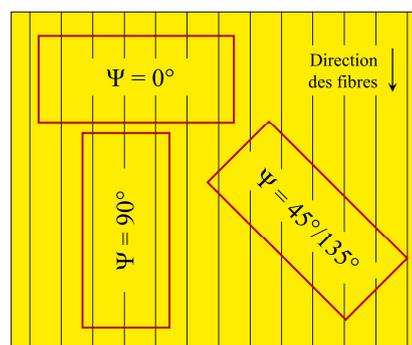


Figure 1 : position des éprouvettes

2.2 Essais de détournage

Les essais d'usinage sont effectués sur une fraiseuse trois axes *Mécanuméric Charlyrobot 2U* de puissance à la broche 1,1 kW. La mise en position latérale de l'éprouvette est réalisée au moyen d'une cale dédiée (en bleu sur la Figure 2) tandis qu'une cale amovible permet de régler la longueur de porte-à-faux. Le maintien en position est ensuite effectué grâce à une bride serrée de façon équilibrée à 3 N.m.

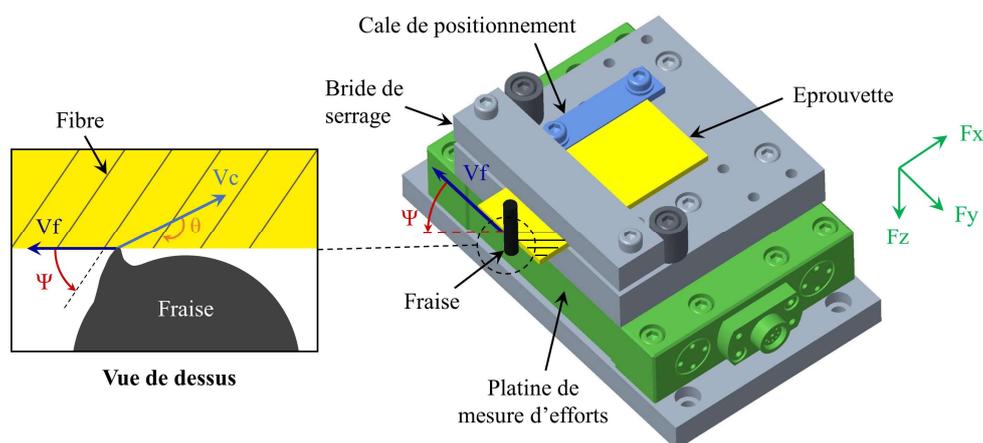


Figure 2 : principe des essais de détournage

Le détournage est réalisé en avalant suivant une trajectoire rectiligne parallèle à la face avant du système de bridage. L'orientation des fibres est définie de façon similaire à Sheikh-Ahmad *et al.* (Sheikh-Ahmad et al., 2019) par l'angle Ψ (par rapport à la vitesse d'avance) et de façon instantanée par l'angle θ (par rapport à la vitesse de coupe). Ainsi, Ψ traduit l'orientation des fibres à l'échelle de l'outil et θ à l'échelle de la dent. Les plages d'angles θ associées à chaque orientation de fibres Ψ sont données dans le Tableau 2. Ces

plages dépendent de l'engagement radial (cf. Tableau 4) qui a donc un impact direct sur l'orientation des fibres instantanée pendant la coupe.

Tableau 2 : plages d'angles θ associées à chaque orientation de fibres Ψ

Plage	Ψ (°)	$\theta_{\text{entrée}}$ (°)	θ_{sortie} (°)
$\theta_{\Psi=0^\circ}$	0	33,6	0
$\theta_{\Psi=45^\circ}$	45	168,6	135
$\theta_{\Psi=90^\circ}$	90	123,6	90
$\theta_{\Psi=135^\circ}$	135	78,6	45

Une première passe d'usinage avec un outil dédié permet de définir précisément la longueur de porte-à-faux à 15,5 mm tout en assurant un engagement radial constant pour la passe utile et identique sur l'ensemble des essais. La deuxième passe, qui constitue l'essai proprement dit est effectuée avec une fraise multi-dents à taille diamant revêtue *SECO 871060.0-DURA* (Figure 3) dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 3. Les conditions de coupe utilisées sont indiquées dans le Tableau 4.



Figure 3 : fraise multi-dents à taille diamant et détail d'une dent

La Figure 4 représente une portion de fraise active pour l'engagement radial étudié à un instant donné. Les différentes arêtes de coupe actives sont détaillées sur la Figure 5. A cet instant, deux dents (notées n°1 et 2) sont dans la matière et une troisième est en train d'y entrer (n°3). Il est à noter que sur l'épaisseur de l'éprouvette usinée, le nombre de dents engagées à un instant donné varie (de 2 à 4 dents simultanément dans la matière), ce qui a des conséquences sur les efforts comme nous le verrons par la suite.

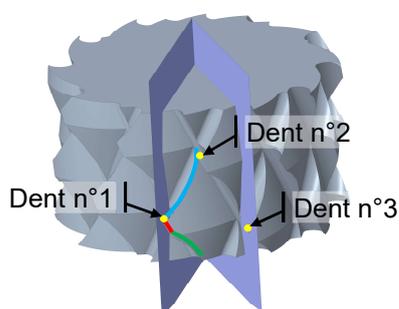


Figure 4 : portion de fraise active à un instant donné

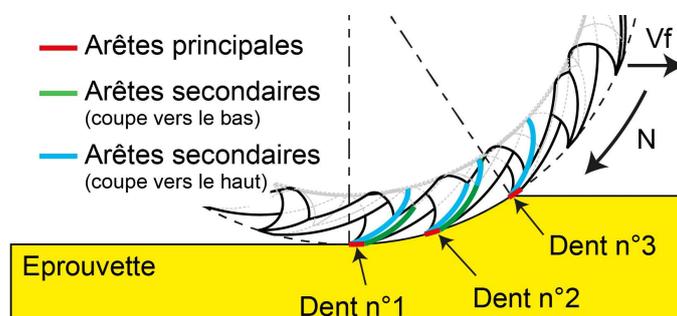


Figure 5 : visualisation des arêtes de coupe actives associées

Cinq essais de détournage identiques sont effectués pour chacune des quatre orientations de fibres Ψ . Afin de limiter tout effet de l'usure, un outil neuf différent est utilisé pour chaque orientation et les cinq essais sont ensuite réalisés avec le même outil.

Tableau 3 : caractéristiques de l'outil

Diamètre (mm)	6	Catalogue
Angle d'hélice à droite (°)	25	
Angle d'hélice à gauche (°)	27	
Nombre d'hélices à droite	10	Mesure
Nombre d'hélices à gauche	12	
Angle d'hélice droite = gauche (°)	30	

Tableau 4 : conditions de coupe

Vitesse de coupe (m/min)	115
Vitesse d'avance (mm/min)	732
Profondeur de passe (mm)	3,15
Engagement radial (mm)	0,5
Dépassement d'outil (mm)	2

2.3 Efforts de coupe

Les efforts de coupe sont mesurés selon les trois directions de l'espace grâce à une platine de mesure piézoélectrique *Kistler 9129AA* située sous le système de bridage. Celle-ci est connectée à un amplificateur de charge *Kistler LabAmp type 5167A* et les signaux sont enregistrés par un module d'acquisition *Brüel & Kjaer 3053-B-120* avec une fréquence d'échantillonnage de 65536 Hz. Cette fréquence d'échantillonnage élevée permet de restituer correctement les phénomènes de haute fréquence tels que le passage des dents. Du fait que plusieurs dents sont engagées simultanément dans la matière, les efforts sont analysés dans le repère pièce (cf. Figure 2), le passage dans le repère outil n'étant en effet pas immédiat. Pour chaque essai, la zone correspondant au régime établi pendant usinage est extraite des signaux et les efforts moyens $F_{x_{moy}}$, $F_{y_{moy}}$, $F_{z_{moy}}$ sont calculés selon les trois directions de mesure (Figure 6). La résultante des efforts moyens (R) est également déterminée (Eq.1).

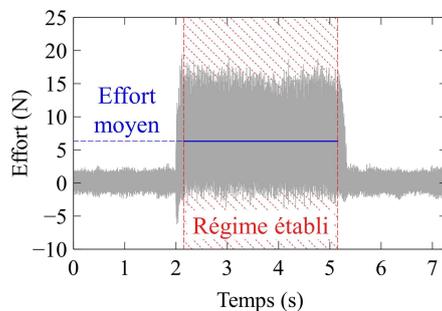


Figure 6 : régime établi et effort moyen

$$R = \sqrt{F_{x_{moy}}^2 + F_{y_{moy}}^2 + F_{z_{moy}}^2} \quad (1)$$

Les efforts moyens permettent une approche globale qui doit être complétée par une approche plus locale pour appréhender les effets dynamiques.

3 Résultats expérimentaux

3.1 Approche globale

Les efforts de coupe moyens dans les trois directions de mesure sont représentés en fonction des plages d'angles θ associées à chaque orientation de fibres Ψ sur la Figure 7. De la même manière, l'effort résultant est également représenté sur la Figure 8. Sur l'ensemble des essais, les efforts moyens obtenus sont positifs. Pour $F_{x_{moy}}$ et $F_{y_{moy}}$, ce résultat est cohérent avec le mode d'usinage utilisé (en avalant) tandis que pour $F_{z_{moy}}$, cela signifie que la fraise génère un effort axial dirigé vers le bas sur la pièce, en accord

avec les caractéristiques de l'outil données par le fabricant. Cet effort axial s'explique par le rôle prépondérant de l'arête principale de coupe (cf. Figure 3) qui dirige naturellement l'effort vers le bas du fait de son orientation. En effet, cette arête est entièrement localisée sur la périphérie de la fraise et de ce fait, elle enlève une épaisseur de matière maximale sur toute sa longueur contrairement aux arêtes secondaires où l'épaisseur décroît après l'attaque. Ce phénomène est par ailleurs sans doute amplifié par le nombre d'hélices à gauche (coupe vers le bas) plus élevé qu'à droite (coupe vers le haut).

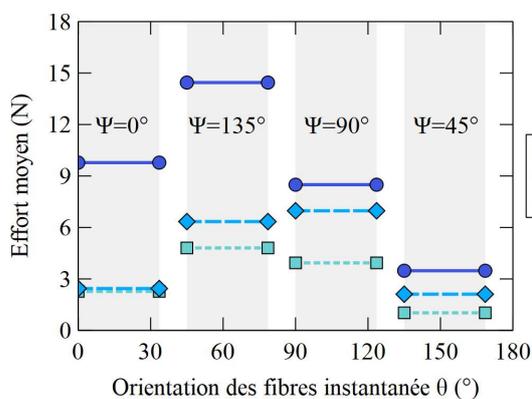


Figure 7 : efforts moyens

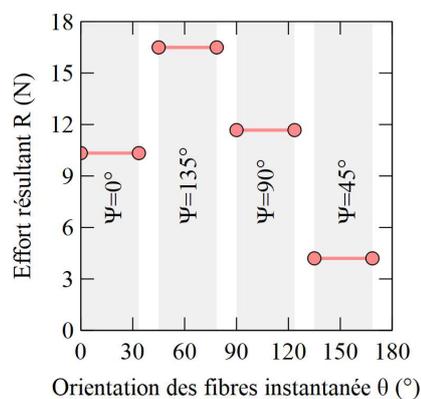


Figure 8 : effort résultant

Nous observons que, quelle que soit l'orientation des fibres, $F_{x_{moy}}$ donne les valeurs les plus élevées tandis que les valeurs les plus faibles sont obtenues pour $F_{z_{moy}}$. En particulier, l'effort moyen dans la direction de l'avance $F_{y_{moy}}$ est systématiquement plus faible que l'effort moyen dans la direction perpendiculaire à l'avance $F_{x_{moy}}$. Ce phénomène a également été observé par Haddad *et al.* en détournage de composites MD-CFRP (Haddad *et al.*, 2013) et presque systématiquement par Wang *et al.* en coupe orthogonale de composites UD graphite/époxy pour $0^\circ < \theta < 90^\circ$ (Wang *et al.*, 1995). La présence d'efforts importants dans le sens perpendiculaire à l'avance a été expliquée par le phénomène de retour élastique du matériau contre la face de dépouille de l'outil (Wang *et al.*, 1995). Ainsi, nous observons un phénomène similaire dans le cas des GFRP, bien que le module d'élasticité longitudinal des fibres de verre soit globalement beaucoup plus faible que celui des fibres de carbone (Sheikh-Ahmad, 2009).

Nous constatons également que les résultats obtenus sont fortement impactés par l'orientation des fibres (Figure 7). Pour $F_{x_{moy}}$ et $F_{z_{moy}}$, les valeurs augmentent entre les deux premières plages, le maximum étant atteint pour $\theta_{\psi=135^\circ}$. Les valeurs diminuent ensuite pour les plages suivantes et le minimum est obtenu pour $\theta_{\psi=45^\circ}$. Il est intéressant de constater que l'orientation des fibres, qui est définie dans le plan de l'éprouvette a aussi un effet sur l'effort axial perpendiculaire à ce plan. Une tendance différente est constatée pour $F_{y_{moy}}$ avec des valeurs relativement symétriques par rapport à $\theta \approx 90^\circ$. $F_{y_{moy}}$ est le plus élevé pour $\theta_{\psi=90^\circ}$ et le plus faible pour $\theta_{\psi=45^\circ}$. En termes de répartition des efforts dans les trois directions de mesure, $F_{x_{moy}}$ est très supérieur à $F_{y_{moy}}$ et $F_{z_{moy}}$ pour les deux plages où $\theta < 90^\circ$ tandis que la répartition est plus homogène pour les plages où $\theta \geq 90^\circ$. Enfin, l'effort résultant le plus élevé est obtenu pour $\theta_{\psi=135^\circ}$ et le plus faible pour $\theta_{\psi=45^\circ}$, tandis que des valeurs comparables sont observées pour les deux autres plages (Figure 8).

En plusieurs aspects, ces résultats sont similaires à l'effet de l'orientation des fibres sur les efforts en coupe orthogonale. Bien que nos efforts soient mesurés dans un repère fixe, la comparaison avec la coupe orthogonale a du sens car l'engagement radial de l'outil est faible par rapport à son diamètre. Premièrement, l'évolution de $F_{y_{moy}}$ en fonction de θ est cohérente avec la tendance observée en coupe orthogonale pour l'effort de coupe. En effet, plusieurs travaux montrent que l'effort de coupe augmente jusqu'à $\theta = 90^\circ$ où il atteint son maximum puis tend à diminuer pour $\theta > 90^\circ$ (Bhatnagar et al., 1995 ; Meng et al., 2020 ; Wang et al., 1995 ; Yan et al., 2019). Deuxièmement, l'évolution de $F_{x_{moy}}$ en fonction de θ correspond également à la tendance observée en coupe orthogonale pour l'effort normal, qui est globalement plus élevé pour $\theta < 90^\circ$ que pour $\theta > 90^\circ$ (Bhatnagar et al., 1995 ; Meng et al., 2020 ; Wang et al., 1995 ; Yan et al., 2019). Troisièmement, $F_{x_{moy}}$ est très supérieur à $F_{y_{moy}}$ pour les plages où $\theta < 90^\circ$, ce qui correspond à la zone où cet effet est identifié par Wang *et al.* (Wang et al., 1995), comme évoqué précédemment.

Les tendances différentes observées pour $F_{x_{moy}}$ et $F_{y_{moy}}$ entre $0^\circ < \theta < 90^\circ$ et $90^\circ < \theta < 180^\circ$ suggèrent que la coupe est régie par des mécanismes différents dans ces deux zones. Ceci rejoint en particulier le travail de Sheikh-Ahmad en coupe orthogonale qui distingue deux mécanismes prépondérants : le type III/IV pour $0^\circ < \theta \leq 90^\circ$ et le type V pour $\theta > 90^\circ$ (Sheikh-Ahmad, 2009). Les surfaces usinées obtenues pour $\Psi = 135^\circ$ et $\Psi = 45^\circ$, où l'angle θ_{sortie} vaut respectivement 45° et 135° (soit le centre des deux zones précédentes) sont présentées sur les Figure 9 et 10. La surface usinée à $\Psi = 135^\circ$ est plutôt lisse tandis qu'à $\Psi = 45^\circ$ une surface moins régulière est obtenue, ce qui est cohérent avec les mécanismes de type III/IV et V respectivement.



Figure 9 : surface usinée à $\Psi = 135^\circ$

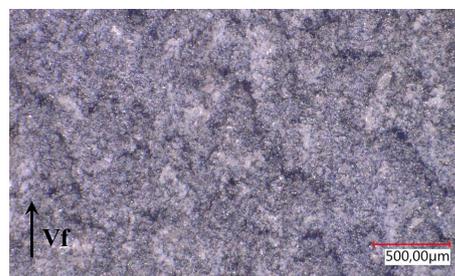


Figure 10 : surface usinée à $\Psi = 45^\circ$

Dans cette approche globale, les phénomènes liés aux entrées et sorties des dents, propres au fraisage, ne sont pas pris en compte. C'est la raison pour laquelle une analyse phénoménologique à l'échelle locale du mécanisme de coupe d'une dent est proposée.

3.2 Approche locale

L'effort F_x en régime établi est représenté sur une durée de trois rotations d'outil sur les Figure 11 et 12 pour $\Psi = 135^\circ$ et $\Psi = 45^\circ$ respectivement, ces orientations étant celles donnant les efforts les plus élevés et les plus faibles dans l'approche globale. Pour $\Psi = 135^\circ$, nous voyons que les signaux présentent une oscillation correspondant à la fréquence de rotation de l'outil ainsi qu'une oscillation de plus haute fréquence correspondant au passage des dents. Cette dernière est visible dans toutes les directions de mesure mais de façon moins nette pour F_y . A partir de l'analyse détaillée de la

géométrie de l'outil, il est possible de déterminer 22 impacts de dents par tour en accord avec les oscillations observées sur les signaux d'effort. Ce décompte est réalisé en dénombrant les arêtes de coupe entrant dans la matière pour un rayon proche de celui de la fraise ($3_{-0,05}^0$ mm). Il est à noter qu'à 4 reprises sur une rotation de l'outil, 2 dents attaquent la matière quasiment simultanément du fait de la géométrie de l'outil et de la profondeur de passe utilisée. Par ailleurs, l'amplitude de la fréquence de passage des dents est modulée par la fréquence de rotation de l'outil. En revanche, nous constatons que sur les signaux obtenus pour $\Psi = 45^\circ$ les impacts des dents sont beaucoup moins visibles. Cela peut s'expliquer par les mécanismes de coupes qui sont différents.

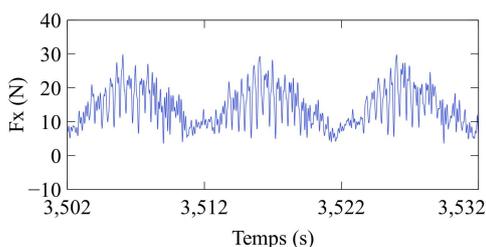


Figure 11 : F_x pour $\Psi = 135^\circ$

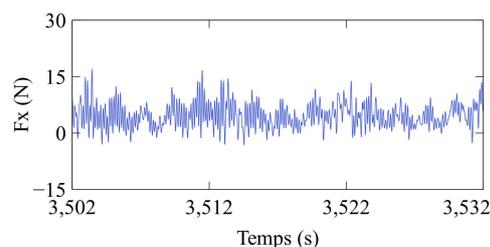


Figure 12 : F_x pour $\Psi = 45^\circ$

C'est pourquoi, nous nous proposons d'étudier non pas l'ensemble de la portion de fraise active, mais à une hauteur donnée. En Figure 13 sont représentées plusieurs sections de la fraise : celles au niveau des faces supérieure et inférieure de l'éprouvette ainsi qu'une section prise au niveau du sommet d'une dent. Il est ainsi intéressant de noter que les impacts des dents ne sont donc pas synchronisés sur toute la hauteur utile de la fraise. Outre un décalage angulaire du fait des hélices, ces sections ne sont pas exactement les mêmes (non superposables). Une section caractéristique est celle passant par le sommet d'une dent (matérialisé par un point jaune sur la Figure 4). Au niveau d'une section donnée, sur un tour de fraise, les arêtes de coupe attaquent l'éprouvette avec une périodicité variable et enlèvent une épaisseur de matière également variable. Dans les conditions expérimentales étudiées ici, l'entrée dans la matière d'une arête donnée à chaque tour a lieu tous les 0,12 mm et lorsque l'on considère 2 arêtes successives (associées aux dents nommées 1 et 2 en Figure 4 et Figure 5), les impacts sont distants de 10 μm , c'est-à-dire sensiblement le diamètre d'une fibre de verre.

A l'échelle des dents et de l'effort instantané, les mécanismes de coupe changent en cours d'usinage. En effet, du fait de la rotation de la fraise, les angles évoluent au cours de la coupe, selon l'orientation des fibres et l'engagement radial. Sur la Figure 14, la position d'une même dent est visualisée en entrée et en sortie de matière pour $\Psi = 135^\circ$ et $\Psi = 45^\circ$ respectivement. A $\Psi = 135^\circ$, en entrée comme en sortie, le mécanisme peut être assimilé à un mécanisme de type III/IV avec un cisaillement transverse continu des fibres. A contrario, à $\Psi = 45^\circ$, en entrée, l'attaque se fait quasiment parallèlement aux fibres. C'est un phénomène de coupe de type I (délamination) qui se produit alors qu'en sortie, le mécanisme est de type V (flexion – cisaillement). C'est la raison pour laquelle les efforts de coupe sont plus importants à $\Psi = 135^\circ$. La variation d'amplitude des pics d'effort liés aux dents à $\Psi = 135^\circ$ s'explique par le fait qu'à tout instant l'effort est une combinaison de dents plus ou moins engagées, angulairement comme radialement. Les signaux

d'efforts à $\Psi = 135^\circ$ sont peu bruités, en lien avec la surface générée qui est régulière. En revanche, à $\Psi = 45^\circ$, le mécanisme de coupe de type V génère une surface plus irrégulière et les efforts sont davantage bruités et irréguliers. Par ailleurs, les impacts des dents sont moins marqués pour F_y , car les autres dents déjà engagées induisent un effort de coupe majoritairement dirigé suivant Y, réduisant l'impact de la nouvelle dent.

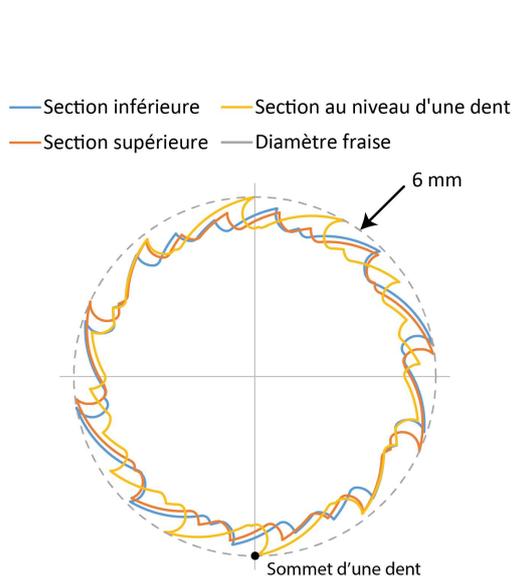
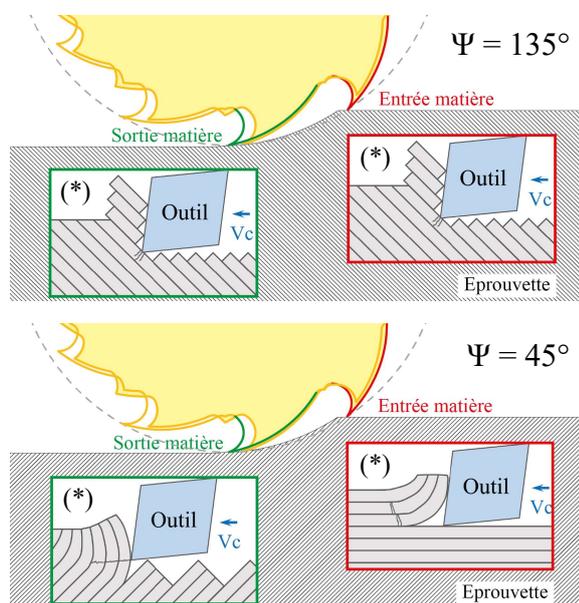


Figure 13 : sections de la fraise



(*) Adapté de Sheikh-Ahmad, 2009

Figure 14 : mécanismes de coupe

4 Conclusions et perspectives

Dans ces travaux, les efforts de coupe en détourage de composites UD-GFRP avec des fraises multi-dents à taille diamant ont été étudiés à conditions de coupe constantes et pour des orientations de fibres sélectionnées. L'approche globale a montré que les efforts moyens sont plus élevés dans la direction perpendiculaire à l'avance que dans la direction d'avance pour toutes les orientations de fibres testées. Avec la géométrie d'outil utilisée, des efforts axiaux dirigés vers le bas sont également constatés. De manière générale, les efforts moyens sont fortement impactés par l'orientation des fibres dans le matériau. Les tendances observées sont cohérentes avec l'effet de l'orientation des fibres et les mécanismes de coupe identifiés en coupe orthogonale. De plus, l'approche locale a montré que les effets dynamiques propres à l'outil utilisé sont différents selon les mécanismes de coupe en jeu. Le passage des dents est visible sur les signaux d'efforts à $\Psi = 135^\circ$ tandis que les signaux sont beaucoup moins réguliers à $\Psi = 45^\circ$, en lien avec les surfaces usinées obtenues. Sur la base de ces premiers résultats, l'étude sera complétée par l'analyse d'autres critères de qualité de la coupe (état de surface, défauts...). A plus long terme, la parfaite connaissance de la géométrie d'outil et une analyse par imagerie rapide de la coupe permettrait d'estimer les efforts de coupe dans le repère outil.

Remerciements

Les auteurs remercient la société *Hexcel* qui a fourni la matière première pour ces travaux ainsi que le *LPIM* de Mulhouse qui a contribué à la caractérisation des composites.

Références

- Bhatnagar, N., Ramakrishnan, N., Naik, N. K., & Komanduri, R. (1995). On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35(5), 701-716. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)93039-9](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)93039-9)
- Caillaud, A., Ritou, M., Garnier, S., & Furet, B. (2009, juin). *Choix de procédés de parachèvement pour les pièces en matériaux composites*. JNC 16, Toulouse, France.
- Gara, S., & Tsoumarev, O. (2016). Effect of tool geometry on surface roughness in slotting of CFRP. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86, 451-461. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8185-9>
- Geier, N., Xu, J., Poór, D. I., Dege, J. H., & Davim, J. P. (2023). A review on advanced cutting tools and technologies for edge trimming of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites. *Composites Part B: Engineering*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.111037>
- Haddad, M., Zitoune, R., Eyma, F., & Castanié, B. (2013). Machinability and surface quality during high speed trimming of multi directional CFRP. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 13(2/3), 289-310. <https://doi.org/10.1504/IJMMM.2013.053229>
- Haddad, M., Zitoune, R., Eyma, F., & Castanie, B. (2014). Study of the surface defects and dust generated during trimming of CFRP : Influence of tool geometry, machining parameters and cutting speed range. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 66, 142-154. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.07.005>
- Janardhan, P., Sheikh-Ahmad, J., & Cheraghi, H. (2006). Edge Trimming of CFRP with Diamond Interlocking Tools. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2006-01-3173>
- Knap, A., Dvořáčková, Š., & Knápek, T. (2022). Study of the Machining Process of GFRP Materials by Milling Technology with Coated Tools. *Coatings*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/coatings12091354>
- Meng, Q., Cai, J., Cheng, H., & Zhang, K. (2020). Investigation of CFRP cutting mechanism variation and the induced effects on cutting response and damage distribution. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(7), 2893-2907. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04667-1>
- Nguyen-Dinh, N., Hejjaji, A., Zitoune, R., Bouvet, C., & Crouzeix, L. (2018). Machining of FRP Composites : Surface Quality, Damage, and Material Integrity : Critical Review and Analysis. In *Futuristic Composites* (p. 1-35). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2417-8_1
- Prakash, R., Krishnaraj, V., Zitoune, R., & Sheikh-Ahmad, J. (2016). High-Speed Edge Trimming of CFRP and Online Monitoring of Performance of Router Tools Using Acoustic Emission. *Materials*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/ma9100798>
- Sheikh-Ahmad, J. (2009). *Machining of Polymer Composites*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68619-6>
- Sheikh-Ahmad, J., El-Hofy, M., Almaskari, F., Kerrigan, K., & Takikawa, Y. (2019). The evolution of cutting forces during slot milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer (UD-CFRP) composites. *Procedia CIRP*, 85, 127-132. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.09.043>
- Sheikh-Ahmad, J., Urban, N., & Cheraghi, H. (2012). Machining damage in edge trimming of CFRP. *Materials and Manufacturing Processes*, 27, 802-808. <https://doi.org/10.1080/10426914.2011.648253>
- Sundi, S. A., Izamshah, R., & Kasim, M. S. (2020). Effect of Machining Parameters on Surface Roughness in Edge Trimming of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP). *Tribology Online*, 15(2), 53-59. <https://doi.org/10.2474/trol.15.53>
- Wang, D. H., Ramulu, M., & Arola, D. (1995). Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35, 1623-1638. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00014-0](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00014-0)
- Yan, X., Zhang, K., Cheng, H., Luo, B., & Hou, G. (2019). Force coefficient prediction for drilling of UD-CFRP based on FEM simulation of orthogonal cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(9), 3695-3716. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04048-8>