

Étude de l'influence des paramètres d'usinage sur des opérations de détourage de composites à renfort fibres de verre

A. COLLAINÉ^a, Y. KHEDR^b, C. JORDAN^c, M. TOURLONIAS^d

a. Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles (LPMT), 11 rue A.Werner, 68093

Mulhouse Cedex - anne.collaine@uha.fr

b. LPMT - youssef.amr-moustafa-khedr@uha.fr

c. LPMT - catherine.jordan@uha.fr

d. LPMT - michel.tourlonias@uha.fr

Résumé :

Cette communication s'intéresse à la problématique du détourage des composites à renfort en fibres de verre (GFRP). Après avoir montré en quoi cette problématique est d'actualité, les objectifs du travail sont présentés. Puis les conditions expérimentales retenues (éprouvettes, machine, outils et stratégie d'usinage) sont décrites. Ensuite, différentes expérimentations sont détaillées. Les premiers essais, dits « de base », permettent de tester les conditions de coupe initialement préconisées pour différents outils et de comparer ceux-ci. Ils permettent aussi de comparer l'incidence de la direction d'usinage par rapport à l'orientation des fibres. Dans les essais suivants, l'incidence de l'évolution de deux paramètres de coupe autour de leurs valeurs de base (la vitesse de coupe V_c et l'avance par dent f_z) sur la qualité de la surface détournée est étudiée.

Abstract :

This survey deals with the issue of contour milling of glass fiber reinforced plastics (GFRP). After showing that the issue is newsworthy, the aim of the work is detailed. Experimental conditions under which the work is done are described: sample processing, milling machine used, tools and machining strategy. Then, the article focuses on the miscellaneous experimentations that have been driven. The first step consists in trying the conditions recommended by the manufacturer for the different tools. The results are then compared, in those standard conditions. A second part of the experimental section draws conclusions on the dependence of machining direction vs fibers orientation. Further experimentations evaluate the surface quality when changing V_c , the cutting speed, and f_z , feed per tooth around their baseline values.

Mots clefs : composites, GFRP, détourage, état de surface

1 Contexte et objectifs

Le marché des matériaux composites est un marché qui ne cesse de progresser depuis de nombreuses années [1], [2]. Les composites fabriqués se distinguent notamment par leur renfort (matière, structure, empilement ...), les matrices utilisées et les applications auxquelles ils se destinent. Aujourd'hui, le marché est essentiellement partagé entre les composites à renforts en fibres de verre (GFRP) et les composites à renforts en fibres de carbone (CFRP). Les premiers sont souvent utilisés dans des applications de grande série et/ou à faible valeur ajoutée tandis que les seconds sont employés dans des applications à forte valeur ajoutée nécessitant de meilleures caractéristiques. Bien que moins performants, les composites GFRP représentent aujourd'hui 95% en volume des composites produits en Europe, les secteurs les plus consommateurs de fibres de verre étant le transport et le bâtiment, ce dernier n'employant pas les fibres de verre uniquement sous forme de composites [3].

L'obtention d'une pièce en matériau composite nécessite deux étapes. La première consiste en la fabrication du composite. Cette étape permet d'obtenir la forme définitive de la pièce avec des dimensions plus ou moins précises. Vient ensuite la seconde étape nommée parachèvement. Celui-ci permet la mise aux dimensions de la pièce mais aussi la création de géométries complémentaires nécessaires à l'utilisation de la pièce (trous de passage, évidements ...).

Un des procédés de parachèvement couramment employé est l'usinage par enlèvement de copeaux (perçage, fraisage voire tournage). La difficulté majeure de l'usinage d'une pièce en composites est d'obtenir une qualité suffisante (précision dimensionnelle, état des surfaces obtenues, absence de délaminage et de fibres résiduelles ...) tout en garantissant une certaine productivité (rapidité d'obtention, coûts outils ...). Devant les difficultés à obtenir des pièces finies de qualité, différentes études s'intéressent à proposer des évolutions du procédé de parachèvement par usinage afin d'améliorer les résultats [4],[5]. Une autre approche consiste à améliorer les outils et les choix de paramètres pour déterminer la solution optimale dans une situation donnée. Si le développement des procédés d'obtention de composites fait l'objet de nombreuses publications, l'étude des procédés de parachèvement reste aujourd'hui insuffisante, en particulier dans le domaine des composites GFRP.

L'effet combiné des paramètres de coupe sur le délaminage, la qualité de surface ou encore la dégradation de l'outil dans les opérations de perçage des composites GFRP a été largement étudié [6], [7], [8], [9]. Dans le cas du fraisage de composites GFRP, l'influence sur la qualité de surface de la direction d'usinage par rapport à l'orientation des fibres est reconnue [10]. Il en est de même pour l'influence des paramètres de coupe [11]. Toutefois, la littérature ne fait pas apparaître d'étude complète et globale sur le détournage des composites GFRP combinant choix des outils / choix des paramètres et résultats, aussi bien en terme de qualité que de productivité. Dans les travaux de thèse travaillant à la définition de comportements, les principes théoriques génériques sont étudiés mais les expérimentations effectuées concernent les composites à renforts en fibres de carbone [12], [13].

Les volumes de production conséquents des composites GFRP, la nécessité d'optimiser leur usinage tant du point de vue de la qualité que de la productivité et le manque de résultats sur le sujet sont autant de raisons qui nous ont décidés à apporter notre contribution dans le détournage des composites GFRP. Dans cette communication, nous présentons les premiers résultats qui constituent les fondations d'une étude plus complète. Après avoir détaillé les conditions expérimentales (matériau, machine, outils choisis ...), nous présentons les premiers essais dans lesquels nous avons testé différents outils sur la base des conditions proposées par le constructeur d'outils. Ceci nous permet d'observer les premiers phénomènes et de comparer ces outils. Les essais suivants étudient l'influence de l'évolution des paramètres de coupe sur la qualité de la surface obtenue.

2 Conditions expérimentales

2.1 Les éprouvettes

Les éprouvettes composites ont été réalisées avec des fibres de verre Vetrotex 136 tex, de référence ZTW EC13 136 tex TD22C. Leur diamètre moyen est de 13 μm , l'ensimage compatible avec l'utilisation de résine à base d'époxy. La matrice est une matrice therm durcissable initialement liquide, à deux composants. C' est un système époxy/amine CY219 et Renlam HY5160 (Huntsmann). Après polymérisation à 40°C pendant 14 jours ou 7 jours à température ambiante, la matrice a une température de fléchissement sous charge de 45 à 50 °C, annoncée par le fabricant. Ce système a été choisi pour sa longue durée de vie en pot à 25°C. Ce paramètre est important pour la maîtrise de la mise en œuvre des composites qui est coûteuse en temps, selon le procédé expérimental choisi.

Les éprouvettes sont fabriquées par un procédé d'enroulement des fibres de sorte à ce qu'elles soient parallèles. On obtient ainsi des composites unidirectionnels.

Le fil de verre est enroulé sur moule parallélépipédique en rotation gérée par un moteur dont on contrôle la vitesse de rotation (Figure 1). Le fil de verre enroulé glisse dans un œillet de guidage dont le déplacement est contrôlé par la rotation d'une vis sans fin, et est entraîné par la rotation du moule. La combinaison entre la vitesse de rotation du moule et celle de la vis ajuste la quantité de verre sur le moule. La rotation de la vis est inversée à chaque extrémité. À chaque inversion, le système est arrêté manuellement, l'imprégnation manuelle à l'aide d'un rouleau ébulleur peut ainsi être réalisée.

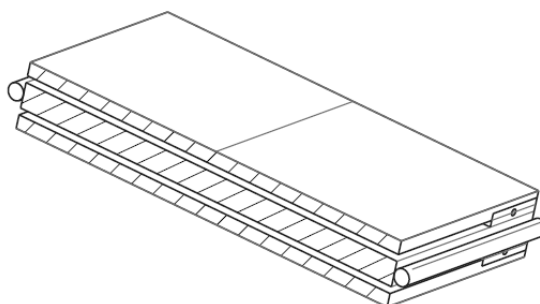


Figure 1 : vue du moule en coupe

Une fois l'enroulement et l'imprégnation achevés, le moule est fermé par deux contre-moules et l'ensemble est placé sous presse, 5 bars, 50°C, pendant 20 heures. La fermeture des contre-moules assure le contrôle de l'épaisseur des deux composites ainsi fabriqués. La température de 50°C nous permet d'abaisser la viscosité de la résine pour une meilleure imprégnation.

Après démoulage, le composite est découpé à l'aide d'une scie circulaire sur table pour fabriquer des éprouvettes destinées aux tests d'usinage. Quelques échantillons ont été prélevés pour différents contrôles.

- **Analyse calorimétrique et détermination de la température de transition vitreuse**

Dans les conditions dans lesquelles nous avons opéré, nous obtenons une température de transition vitreuse de 34°C. La mesure a été obtenue en DSC avec un appareil DSC141 Setaram, à une vitesse standard de montée en température de 10K.min⁻¹. La valeur retenue est le T_g onset correspondant à l'intersection de la tangente à la ligne de base et de la tangente au point d'inflexion de la courbe puissance - température. Le T_g au point d'inflexion est de 44°C. Cette dernière température correspond à la température de fléchissement sous charge donnée par Huntsman.

- **Détermination du taux de fibres de verre**

La masse volumique est déterminée par la méthode d'Archimède sur 4 échantillons. La masse volumique moyenne est de $2,17 \text{ g.cm}^{-3}$ ce qui nous donne des taux de verre de 85,4 % massique et 71,3 % volumique. Ces taux de verre massiques et volumiques sont calculés à partir des relations suivantes obtenues par une simple loi des mélanges, en considérant que le composite ne contient que de la résine et des fibres et est exempt de bulles d'air.

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{X_f}{\rho_f} + \frac{1 - X_f}{\rho_m}$$

$$X_f = \frac{\rho_c - \rho_m}{\rho_f - \rho_m} \frac{\rho_f}{\rho_v}$$

$$\tau_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} X_f$$

- ρ_f masse volumique des fibres (2.6 g.cm^{-3})
- ρ_m masse volumique de la matrice (1.1 g.cm^{-3})
- ρ_m masse volumique du composite.
- X_f taux massique de fibres
- τ_f taux volumique de fibres

2.2 La machine et les outils utilisés

Nous avons à notre disposition une machine Charly 2U équipée d'une broche tournant jusqu'à 24000 tr/min et permettant des avances jusqu'à 100 mm/s. Ces valeurs limites de vitesses nous permettront d'appliquer sans difficultés les conditions de coupe souhaitées. La puissance de la broche est relativement limitée (1,1 kW) ; toutefois, l'usinage de matériaux composites GFRP génère des efforts peu élevés (un effort de coupe de 200 N maximum est cité dans [6], ce qui permet d'espérer appliquer une vitesse de coupe d'environ 300 m/min sans dépassement de puissance, valeur au-delà de notre besoin).

Il existe différents constructeurs de fraises monobloc adaptées à l'usinage des composites. Peu d'entre eux proposent des outils et conditions de coupe en fonction du type de composite à usiner ; de plus, ils se limitent souvent à proposer des solutions pour l'usinage de composites à renforts en fibre de carbone. Afin de démarrer nos essais dans les meilleures conditions possibles, notre choix s'est porté sur des outils de la marque SECO. Ce constructeur propose différentes géométries d'outils et distingue les conditions de coupe pour les composites à renforts en fibres de verre ou fibres de carbone et pour des résines thermoplastiques (TP) ou thermodurcissables (TD).

Dans le cadre de cette communication, nous avons testé trois outils différents parmi ceux proposés par SECO comme étant adaptés au « rainurage » et « détournage » de composites à renforts en fibre de verre et matrice TD. Ils sont présentés dans le Tableau 1. Ces trois outils sont en carbure métallique et ont un diamètre de 6 mm ; ils permettent d'usiner la hauteur de 4mm de nos éprouvettes en composites.




Repère	Référence constructeur	Z	Photo	Revêtement	Particularités
T1	840060R050Z4.0-DURA	4		DURA*	Double hélice pour éviter délaminage
T2	871060.0	10		sans	Denture taille diamant
T3	871060.0-DURA	10		DURA*	Denture taille diamant

Tableau 1 : outils utilisés

*DURA est la marque constructeur du revêtement ; il est réalisé à base de diamant CVD.

Les outils T2 et T3 diffèrent uniquement par le revêtement. Celui-ci doit normalement permettre d'améliorer la durée de vie de l'outil.

2.3 Stratégie d'usinage retenue et description des paramètres

La Figure 2 présente l'outil en situation d'usinage, la pièce étant en place dans son système de serrage. L'ensemble est monté sur la table de la machine.

Nous appelons et notons :

V_c : la vitesse de coupe de l'outil (m/min)

N : la vitesse de rotation de l'outil (tr/min)

f_z : l'avance par dent de l'outil (mm/dent)

V_f : la vitesse d'avance travail de l'outil (mm/min)

φ : l'angle d'orientation de la vitesse d'avance V_f par rapport à l'orientation des fibres

a_p : la profondeur de passe ou engagement axial de l'outil (mm)

a_e : l'engagement radial de l'outil (mm)

D_c : diamètre de coupe = diamètre de l'outil (mm)

Dep : dépassement (mm)

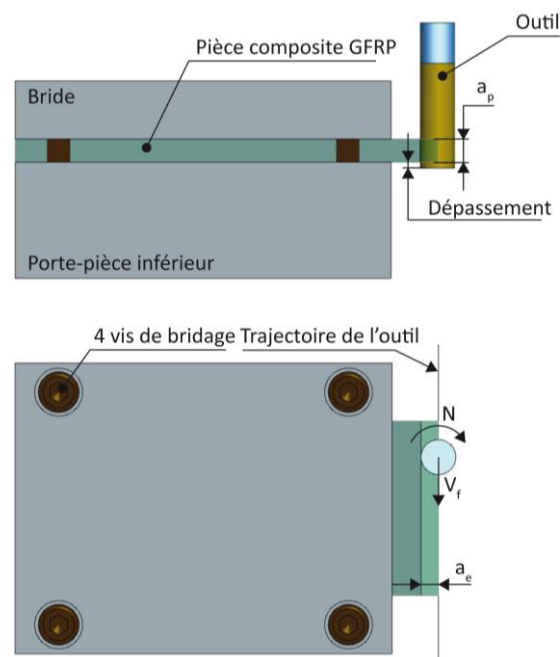


Figure 2 : représentation d'un détourage

Dans le cadre de cette communication, tous les essais ont été réalisés avec un dépassement d'outil $Dep = 1$ mm. La fraise sort de la broche de 25 mm environ. La pièce dépasse du système de serrage de 6 mm environ. De plus, nous nous sommes limités à l'usinage en avalant et sans système de lubrification.

2.5 Méthode d'analyse

Lors de chaque essai, nous avons mesuré l'état de surface et pris des images à la binoculaire (loupe binoculaire Euromex série DZ, grandissement $x16$ à $x160$). Ne disposant pas de matériel de mesure d'état de surface surfacique, la mesure de l'état de surface a été faite par un rugosimètre Mitutoyo SJ201 (profil linéique). La longueur de mesure a été réglée à 2 mm. Nous avons choisi de relever les valeurs de R_z et R_a (μm). Le premier est représentatif de l'amplitude maximale observée entre la ligne moyenne du profil de rugosité et les pics du profil. Le second est la moyenne arithmétique du profil par rapport à la ligne moyenne [14]. Pour chaque surface à caractériser, nous avons effectué 8 mesures dans le sens de la longueur de la surface (L) et 8 mesures dans le sens de la hauteur (H).

Dans la suite, nous nommerons Rz_H et Ra_H (respectivement Rz_L et Ra_L), les relevés de Rz et Ra effectués suivant le sens de la hauteur de la plaque (respectivement de la longueur). De plus, nous ajouterons un indice 0 (respectivement 90) quand la mesure est faite sur une surface détournée dans le sens longitudinal c'est-à-dire parallèlement au sens des fibres (respectivement dans le sens travers, perpendiculairement au sens des fibres) (voir Figure 3).

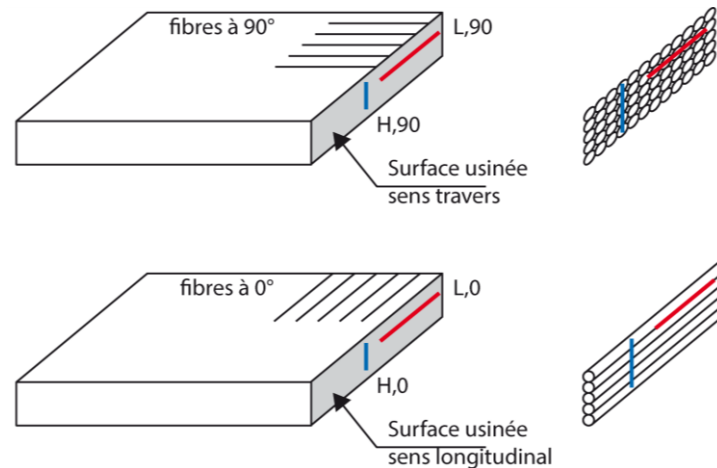


Figure 3 : représentation des éprouvettes et situation des mesures d'état de surface

Pour exemple, $Rz_{L,0}$ représente la mesure de Rz faite dans le sens de la longueur (L) sur une surface détournée dans le sens longitudinal donc parallèlement aux fibres (0). Ou encore, $Ra_{H,90}$ représente la mesure de Ra faite dans le sens de la hauteur (H) sur une surface usinée dans le sens travers soit perpendiculairement aux fibres (90).

3 Résultats et discussion

3.1 Les essais de référence : visualisation de l'effet sens longitudinal /sens travers et de la géométrie de l'outil

Afin de prendre les premiers repères, nous avons choisi de réaliser les premiers essais avec les conditions de coupe de base, en effectuant un détournage à 0 ou 90° et ce pour les trois outils de référence.

Nous avons choisi de travailler avec un engagement axial maximum soit $a_p = 4 \text{ mm} = 67\% \cdot D_c$ et avec un engagement radial faible, l'idée étant d'obtenir une qualité de surface optimale sans trace visible de différents passages d'outils sur la hauteur de la surface. N'ayant pas de recommandation sur la valeur de a_e à choisir pour $a_p = 67\% \cdot D_c$, nous avons choisi $a_e = 0,5 \text{ mm} = 16,7\% \cdot D_c$.

Les conditions de coupe de base recommandées par le constructeur sont récapitulées dans le Tableau 2. Elles sont issues du site SECO (logiciel en ligne [15]). À noter que la vitesse de coupe V_c recommandée est la même quel que soit l'outil (ce qui laisse supposer que celle-ci est davantage liée au matériau à usiner qu'à la géométrie d'outil). Pour l'avance par dent f_z , il y a une différence due à la différence de géométrie d'outil.

Outil	V_c (m/min)	f_z (mm/dent)
T1	170	0,06
T2		0,03
T3		0,03

Tableau 2 : conditions de coupe de base

- **Premiers essais**

Sur la base de ces conditions de coupe choisies, nous avons réalisé un essai pour chaque outil à 0 et 90°. Il s'est avéré que nous avons observé des vibrations chaque fois que l'usinage était fait dans le sens travers (90°). Ces vibrations étaient audibles et sont visibles sur les images prises à la binoculaire (« vagues » sur la surface visibles sur la Figure 4).

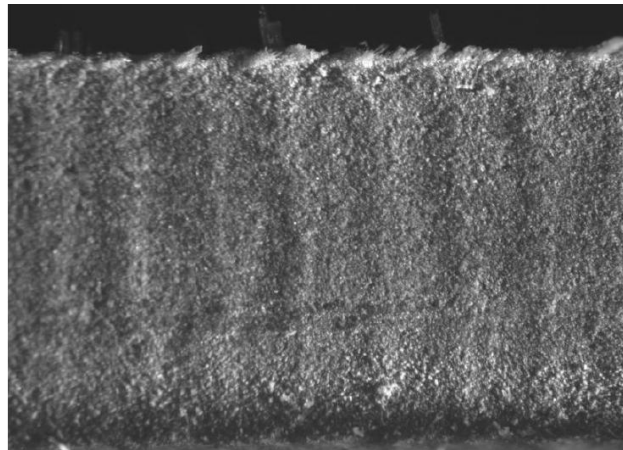


Figure 4 : surface détournée avec vibrations

- **Résultats des essais de référence**

Les vibrations pouvant être dues aux efforts, nous avons cherché à diminuer la section coupée. Souhaitant maintenir le principe du détourage sur toute la hauteur du composite, nous avons choisi de tester la diminution de l'engagement radial a_e jusqu'à ne plus avoir de vibrations. Un premier test à $a_e = 0,3$ mm n'a pas été concluant. A $a_e = 0,2$ mm, les vibrations étaient encore audibles dans le cas des outils T2 et T3. A $a_e = 0,1$ mm nous n'avons plus entendu de vibrations. Nous avons en conséquence retenu cette valeur comme valeur des essais de référence pour le détourage à 90°, les autres paramètres étant inchangés.

Le tableau ci-dessous donne les conditions des essais que nous avons retenues pour nos premières analyses (Tableau 3). Les résultats, en terme d'état de surface, sont donnés sur les graphiques de la Figure 5 et de la Figure 6. Chaque histogramme donne la valeur de la moyenne des 8 relevés pour le paramètre considéré. La barre d'erreur représente l'écart type des 8 mesures.

Direction usinage	Outil	a_e (mm)	Vc (m/min)	fz (mm/dent)	N (tr/min)	Vf (mm/min)
0°	T1	0,5	170	0,06	9019	2165
	T2			0,03		2706
	T3			0,06		2165
90°	T1	0,1		0,03		2706
	T2			0,06		2165
	T3			0,03		2706

Tableau 3 : conditions des essais de référence

L'analyse des résultats concernant le détourage réalisé à 0° (Figure 5) montre que l'on peut considérer les outils T2 et T3 équivalents du point de vue de la qualité des surfaces (du fait de la quasi égalité des 4 paramètres $Ra_{L,0}$, $Ra_{H,0}$, $Rz_{L,0}$ et $Rz_{H,0}$ pour chacun des deux outils). Ceci correspond à ce qui était attendu. En effet, ces deux outils diffèrent uniquement par leur revêtement, ce qui ne doit normalement pas impacter la qualité de surface tant que l'outil n'est pas usé [16].

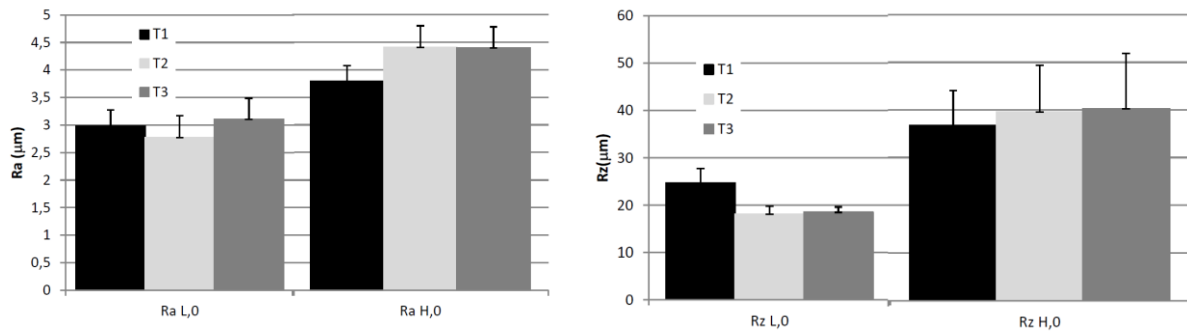


Figure 5 : évolution de l'état de surface pour les essais de base en sens longitudinal (0°)

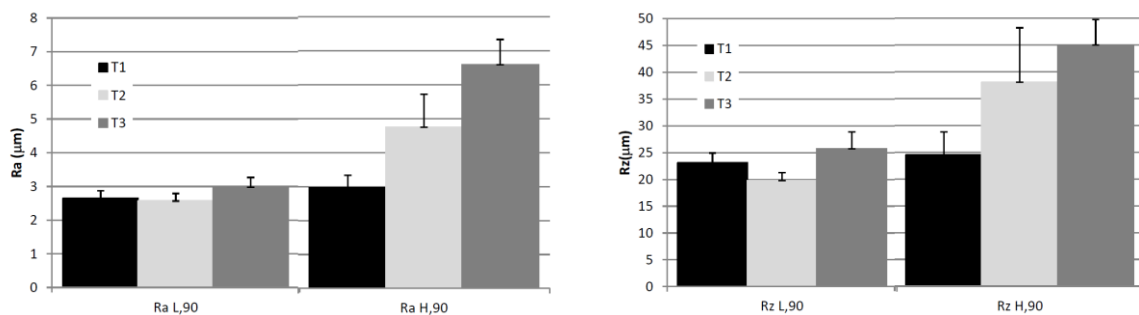


Figure 6 : évolution de l'état de surface pour les essais de base en sens travers (90°)

Ces résultats devraient se retrouver lors du détourage à 90° (Figure 6), ce qui n'est pas le cas. Ceci s'explique par le fait que nous avons observé une détérioration (dents cassées) de ces deux outils probablement dues aux vibrations générées lors des premiers usinages (Figure 7). L'outil ayant le plus de dents détériorées est l'outil T3. C'est donc logiquement que les valeurs des paramètres concernant cet outil divergent des valeurs attendues.

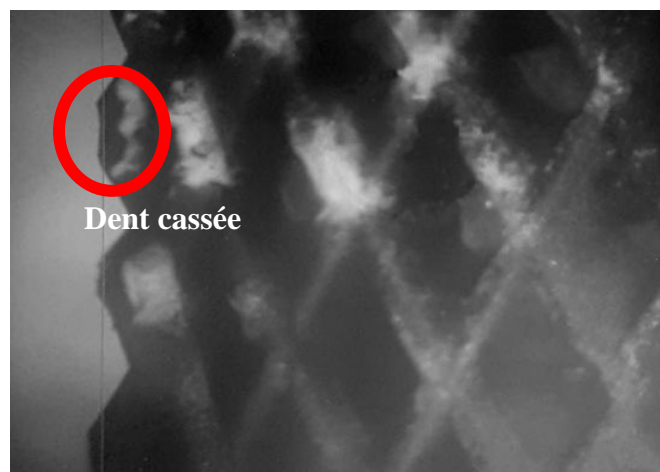


Figure 7 : dent cassée sur l'outil T3

L'analyse des résultats obtenus pour l'outil T1 dans le cas de l'usinage à 0° (Figure 5) montre des valeurs variables lors des mesures faites en hauteur (Ra_H,0 et Rz_H,0) ou faites en longueur (Ra_L,0 et Rz_L,0). Ceci semble cohérent avec la nature de la surface ; en effet, dans le sens de la longueur, la pointe du rugosimètre suit la direction des fibres (sur une fibre ou entre 2 fibres) alors que dans le sens de la hauteur, la ligne de mesure passe par-dessus les fibres successives, transversalement.

Si l'on compare les résultats obtenus dans le détourage à 0° entre les trois outils, on observe une meilleure qualité pour les mesures faites suivant l'épaisseur pour l'outil T1 par rapport à T2 et T3. C'est le contraire pour les mesures dans le sens de la longueur. L'outil T1 ayant un profil constant (hélice sur toute la hauteur) cela peut paraître logique : l'outil n'imprime pas sa géométrie sur la surface ce qui peut être le cas des outils T2 et T3.

Dans le cas de l'usinage à 90° (Figure 6), on s'attendait pour un même outil, à observer des résultats identiques des mesures suivant l'épaisseur et la longueur, la surface étant identique du fait de la position perpendiculaire des fibres. C'est le cas pour l'outil T1 ($Ra_{L,90} \approx Ra_{H,90}$ et $Rz_{L,90} \approx Rz_{H,90}$). Cela aurait dû être le cas pour les outils T2 et T3 mais ce n'est pas du tout le cas. Ceci peut s'expliquer par la détérioration des outils précédemment évoquée.

3.2 Evolution de la vitesse de coupe

L'étude de l'évolution de la qualité en fonction de la vitesse de coupe a été menée pour l'outil T1 uniquement. Nous avons maintenu a_e constant (=0,1 mm) et f_z constant (0,06 mm/dent) et avons fait varier V_c de $\pm 10\%$ et $\pm 20\%$ autour de la valeur de base (170 m/min).

Les résultats obtenus pour Ra dans le sens longitudinal et le sens travers sont représentés sur les graphiques des figures ci-après (Figure 8 et Figure 9). Nous n'affichons pas les valeurs de Rz car les tendances étaient similaires.

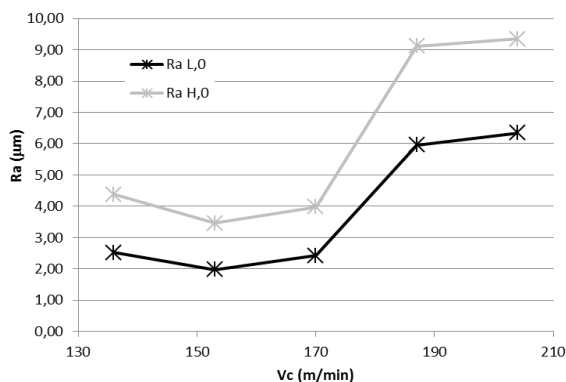


Figure 8 : évolution de Ra à 0° en fonction de Vc

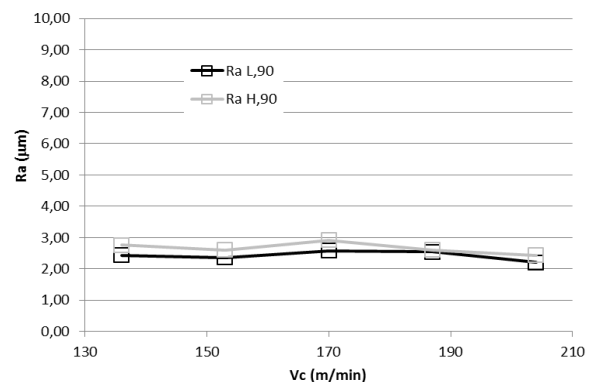


Figure 9 : évolution de Ra à 90° en fonction de Vc

Dans les deux cas, les mesures de Ra sur la longueur et suivant l'épaisseur sont homogènes. Dans le cas de l'usinage à 0° (Figure 8), c'est entre la valeur de base de 170 m/min et -10% que sont observés les meilleurs résultats. La plage intermédiaire semble être une plage optimale de réglage de la vitesse de coupe. Lorsque la vitesse de coupe augmente, l'état de surface se détériore. Ceci a été confirmé par l'aspect des surfaces puisque des fibres émergent de la surface sans pour autant être coupées.

Dans le sens travers (Figure 9), la vitesse de coupe ne semble pas avoir une incidence considérable sur l'évolution de l'état de surface, même si on observe une légère amélioration des valeurs lorsque la vitesse de coupe augmente. Ce résultat n'était pas attendu à l'issue des observations faites à la binoculaire. En effet, les essais aux vitesses de coupe les plus élevées font apparaître de légères « vagues », représentatives de vibrations (Figure 10), pourtant celles-ci ne se retrouvent pas au niveau des mesures. Dans le sens travers, nous avons également observé la présence de fibres résiduelles en bord de pièce au niveau des faces supérieure et inférieure.

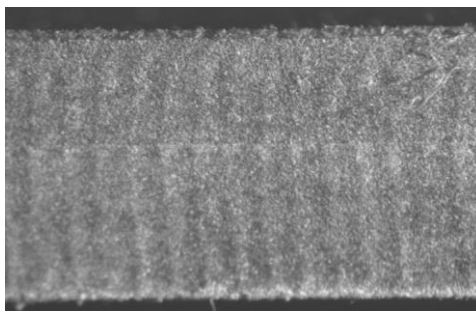


Figure 10 : surface observée à $V_c=204\text{m/min}$, à 90°

Si les résultats sont peu discriminants pour le sens travers (90°), l'influence de la vitesse de coupe est importante dans le sens longitudinal (0°). De plus, les états de surface les meilleurs, à vitesse de coupe donnée, sont systématiquement obtenus avec un détournage dans le sens perpendiculaire aux fibres (90°). Ce résultat confirme le résultat observé dans le cas de l'usinage de composites UD à renforts fibres de carbone [16].

3.3 Evolution de l'avance

Comme pour l'étude de l'évolution de la vitesse de coupe, nous avons réalisé l'étude de l'évolution de l'avance par dent f_z pour l'outil T1 uniquement, en maintenant a_e constant ($=0,1\text{ mm}$) et V_c constant (170 m/min) et faisant varier f_z de $\pm 10\%$ et $\pm 20\%$ autour de la valeur de base ($0,06\text{ mm/dent}$).

Comme pour la variation de la vitesse de coupe, nous obtenons des résultats différents à 0 et 90° . Dans le sens travers, l'état de surface est d'autant meilleur que f_z diminue (Figure 12). Les essais à $+10$ et $+20\%$ font apparaître des traces de vibrations (visibles à la binoculaire). Ceci confirme l'augmentation de R_a . Sur ces même essais, l'écart entre $R_{a_H,90}$ et $R_{a_L,90}$ est quasi constant sauf pour la plus grande valeur de f_z où il devient nul. Cela nous apparaît être une aberration des mesures. Sur ce même point, nous avons les écart-types les plus élevés, ce qui confirme une qualité de surface discutable.

Dans le sens longitudinal (Figure 11), le constat est le même avec une dégradation brusque de l'état de surface pour la plus grande valeur de f_z . L'observation de la surface pour cet essai fait apparaître des fibres arrachées et collées dans la résine. La limite acceptable de f_z semble clairement dépassée. Les observations des surfaces pour les valeurs de f_z en dessous montrent le même phénomène mais dans une moindre mesure. Comme dans le cas de la variation de V_c , une variation de f_z rend rapidement le détournage parallèle aux fibres inefficace.

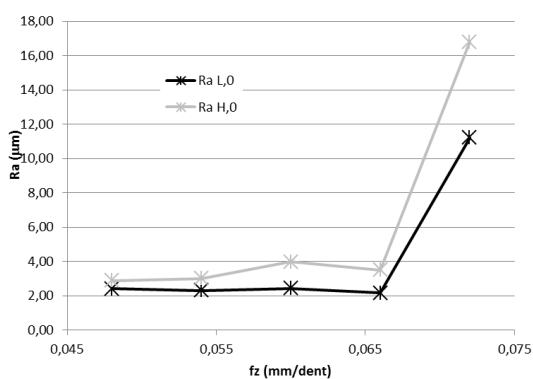


Figure 11 : évolution de R_a à 0° en fonction de f_z

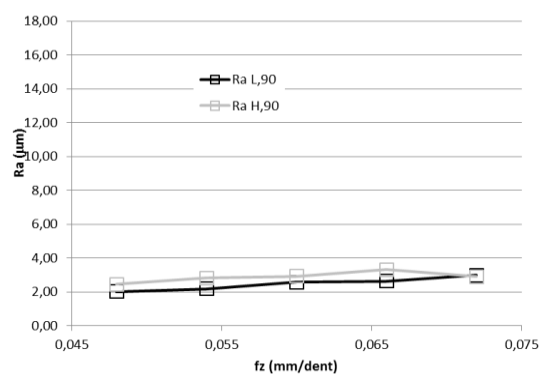


Figure 12 : évolution de R_a à 90° en fonction de f_z

4 Conclusions et perspectives

Dans cette communication différents essais de détournage de composites GFRP ont été présentés dans l'objectif de tester différents outils et d'étudier l'influence de l'orientation de l'usinage par rapport aux fibres et des paramètres de coupe V_c et f_z sur la qualité des surfaces obtenues. Différents résultats ont été mis en évidence. Le premier résultat significatif est la différence évidente dans les résultats obtenus suivant la direction d'usinage. Si le détournage réalisé parallèlement au sens des fibres n'a jamais généré de vibrations, une modification de paramètres de coupe peut vite altérer la qualité de surface obtenue du fait de l'arrachement des fibres. Dans le sens travers, la coupe est plus nette à l'exception des bords de pièces, mais un mauvais choix de paramètres peut vite entraîner des vibrations, celles-ci étant préjudiciables à la qualité de surface et pouvant conduire à la mort prématurée de l'outil. Concernant l'influence des paramètres, nous avons observé qu'une augmentation de l'avance par dent f_z tend à détériorer la qualité de surface. Pour la vitesse de coupe, une plage moyenne semble donner les meilleurs visuels tant en terme de mesure que de forme de surface.

De nombreuses pistes peuvent être envisagées pour progresser dans ces travaux, comme par exemple tester d'autres engagements d'outils (petite profondeur de passe et engagement radial élevé), investiguer des plages de variation de f_z et V_c plus importantes, tester les variations de paramètres sur tous les outils pour voir si l'influence est la même, compléter l'étude par un travail sur la durée de vie des outils...

Si les premiers résultats sont encourageants et les perspectives nombreuses, ils rendent évidente la nécessité de mesurer les vibrations et d'avoir à notre disposition un moyen de caractérisation de la qualité de surface de type surfacique. La mesure des vibrations permettra de mieux délimiter les plages d'utilisation d'un outil par rapport aux conditions de coupe. Un moyen surfacique de caractérisation de la qualité de surface rendra nos mesures plus fiables et réalistes ; avec la méthode employée actuellement, bien que le nombre de mesure soit important, il est toujours possible de douter de la représentativité des surfaces.

Remerciements

Nous tenons à remercier la société Vetrotex Saint-Gobain qui nous a gracieusement offert les bobines de fibres de verre utiles à la fabrication de nos éprouvettes.

Références

- [1] « Les composites : des matériaux d'avenir - Partie 2 : Marché et évolutions ».
- [2] « 2016: a good year for composites », *JEC composites magazine*, n° 111, p. 21-23, mars 2017.
- [3] E. Witten, T. Kraus, et M. Kuhnel, « Composites Market Report 2016 - Market developments, trends, outlook and challenges », nov. 2016.
- [4] P. Mehbudi, V. Baghlani, J. Akbari, A. R. Bushroa, et N. A. Mardi, « Applying Ultrasonic Vibration to Decrease Drilling-Induced Delamination in GFRP Laminates », *Procedia CIRP*, vol. 6, p. 577-582, janv. 2013.
- [5] E. Uhlmann *et al.*, « Machining of Carbon and Glass Fibre Reinforced Composites », *Procedia CIRP*, vol. 46, p. 63-66, 2016.

- [6] A. I. Azmi, « Monitoring of tool wear using measured machining forces and neuro-fuzzy modelling approaches during machining of GFRP composites », *Advances in Engineering Software*, vol. 82, p. 53-64, 2015.
- [7] B. V. Kavad, A. B. Pandey, M. V. Tadavi, et H. C. Jakharia, « A Review Paper on Effects of Drilling on Glass Fiber Reinforced Plastic », *Procedia Technology*, vol. 14, p. 457-464, janv. 2014.
- [8] A. K. Parida, B. C. Routara, et R. K. Bhuyan, « Surface roughness model and parametric optimization in machining of GFRP composite: Taguchi and Response surface methodology approach », *Materials Today: Proceedings*, vol. 2, p. 3065-3074, janv. 2015.
- [9] K. Palanikumar, « Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites », *Measurement*, vol. 44, p. 2138-2148, déc. 2011.
- [10] G. Venu Gopala Rao, P. Mahajan, et N. Bhatnagar, « Machining of UD-GFRP composites chip formation mechanism », *Composites Science and Technology*, vol. 67, p. 2271-2281, 2007.
- [11] A.-K. Parida, R. Das, A. K. Sahoo, et B. C. Routara, « Optimization of Cutting Parameters for Surface Roughness in Machining of GFRP Composites with Graphite/fly Ash Filler », *Procedia Materials Science*, vol. 6, p. 1533-1538, janv. 2014.
- [12] A. BOUDELIER-CAILLAUD, « Modélisation et optimisation des opérations de parachèvement de pièces en matériaux composites », Thèse de l'Université de Nantes, 2011.
- [13] M. HADDAD, « Etude de l'impact des défauts d'usinage des structures composites par détournage sur leur comportement mécanique », Thèse de l'Université de Toulouse, 2013.
- [14] NF-EN ISO 4287, « Spécification géométrique des produits (GPS) - État de surface : méthode du profil - Termes, définitions et paramètres d'état de surface ».
- [15] SECO, « Suggest : obtenir des préconisations d'outils et d'assemblage ». .
- [16] W. Hintze et D. Hartmann, « Modeling of Delamination During Milling of Unidirectional CFRP », *Procedia CIRP*, vol. 8, p. 444-449, janv. 2013.