

Evaluation expérimentale du comportement d'un composite carbone/époxy en usinage

Y. Turki^a, M. Habak^a, R. Velasco^a, P. Vantomme^a, Z. Aboura^b

a. Laboratoire des Technologies Innovantes, IUT d'Amiens, Dpt GMP, Université de Picardie Jules Verne
Avenue des Facultés Le Bailly, 80001 Amiens Cedex 1, France

b. Laboratoire Roberval, Université des Technologies de Compiègne, 60206 Compiègne Cedex, France

Résumé :

Les matériaux composites sont largement utilisés (aéronautique) du fait de leurs propriétés mécaniques avantageuses (rapport poids/résistance). En raison de la complexité des phénomènes présents dans la zone de coupe, les connaissances actuelles sur leur usinage sont limitées et empêchent leur utilisation optimale. L'objectif de cette étude est d'analyser le comportement du composite carbone/époxy durant l'usinage. Dans ce contexte, des essais de détournage ont été réalisés sur des composites unidirectionnels carbone/époxy. Cinq orientations de fibres ($0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ et 90°) et différentes valeurs pour chaque paramètre de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance et profondeur de coupe) ont été étudiées pour dégager les tendances d'évolution des conditions de coupe. Les résultats expérimentaux montrent que l'effort de coupe diminue lorsque la vitesse de rotation augmente mais croît avec la vitesse d'avance et la profondeur de passe. Aussi il a été constaté que l'orientation des fibres est un facteur clé qui influe sur les efforts de coupe et détermine l'état de surface du produit usiné.

Abstract :

The objective of this study is to investigate the behavior of composites during routing, compared to orthogonal cutting. Despite the progress enjoyed, the current knowledge of machining composites, unfortunately, is inadequate for its optimum utilization in many applications owing to the complexity of the phenomena involved in the cutting area. This work aims to understand the influence of machining on the workpiece. Therefore, routing tests without lubrication were carried out on unidirectional carbon/epoxy composites with carbide tools. Five fiber orientations θ ($0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ and 90°), were adopted and a range of cutting parameters was utilized. Experimental results show that cutting forces increase with feed rate and cutting depth. On the contrary, it decreases with spindle speed. It was also found that fiber orientation is a key factor that contributes to the generation of cutting force F_c and determines the surface quality of the machined composite.

Mots clés: usinage, composite, détournage, forces de coupe, paramètres de coupe, orientation des fibres.

1 Introduction

Les matériaux composites sont aujourd'hui largement utilisés dans de nombreux secteurs industriels tels que l'aéronautique, la construction automobile, le nucléaire, le génie biomédical... Les raisons d'un tel succès sont à attribuer à leurs caractéristiques mécaniques spécifiques élevées. Néanmoins, leur usinage reste mal maîtrisé vu la complexité des phénomènes intervenant dans la zone de coupe. Pendant l'enlèvement de la matière et en raison de l'hétérogénéité et de l'anisotropie de ces matériaux, la coupe peut engendrer des endommagements qui vont croître avec la répétition des sollicitations imposées à la structure en service, et éventuellement conduire à sa ruine. Ces endommagements sont principalement le délaminage, l'arrachement des fibres, la décohésion et la dégradation d'origine thermique.

Des études sur des composites carbone/époxy au cours de la coupe orthogonale ont montré que les efforts de coupe et le produit final dépendent de plusieurs paramètres :

- L'orientation des fibres θ est le facteur clé qui détermine l'état de surface et la forme du copeau ainsi que son mode de formation [1, 2]. L'usinage des composites unidirectionnels à 0° produit des copeaux sous forme de grands débris fragmentés. Leur quantité diminue en augmentant l'orientation des fibres. Ces copeaux sont remplacés par des petits débris pour $\theta = 45^\circ$. Pour des orientations de 90° , des copeaux discontinus poudreux ont été observés. Ce paramètre a aussi une influence importante sur les forces de coupe [1]. L'effort de coupe subit une croissance progressive jusqu'à $\theta = 75^\circ$, il augmente brusquement lorsque θ atteint 90° . Tandis que l'effort de poussée croît jusqu'à $\theta = 15^\circ$ puis il demeure presque constant jusqu'à $\theta = 75^\circ$. Bhatnagar et al. [3] mettent en évidence une contradiction, puisque ils ont conclu que la force de poussée diminue lorsque θ varie entre 0° et 75° .
- La profondeur de coupe a_p a une influence considérable sur le procédé d'usinage. Venu et al. [4] ont observé que l'évolution des efforts de coupe et de poussée en fonction de ce paramètre est presque linéaire durant les essais expérimentaux de coupe orthogonale du composite unidirectionnel carbone/époxy. Ils ont noté un taux d'évolution égal à 29% lorsque a_p varie entre 0.1 à 0.2 mm. Ils ont confirmé ces résultats numériquement en développant un modèle tridimensionnel macro-mécaniques par la méthode des éléments finis. Ces observations ont été validées au cours d'autres études [5].
- Iliescu [6] a analysé l'évolution des efforts en fonction de la vitesse de coupe V_c (V_c variant entre 6 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ et 60 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$). Il a montré que V_c n'influe pas fortement sur les efforts de coupe. Les mêmes résultats ont été notés par Wang et al. [1] qui ont étudié un intervalle de vitesses de coupe pour des valeurs plus basses (4, 9 et 14 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$).

Le détournage des composites unidirectionnels carbone/époxy a fait l'objet de moins d'études. Ce travail vise à analyser les influences de l'orientation des fibres et des paramètres de coupe sur les efforts de coupe en détournage et d'établir des liens éventuels qui peuvent exister entre les résultats d'usinage en coupe orthogonale précédemment cités et ceux obtenus en détournage.

2 Expérimentation

Le matériau étudié est un composite à fibres de carbone unidirectionnelles. La matrice utilisée est un mélange d'une résine thermodurcissable de type époxyde SR1710 avec le durcisseur SD8824 fournies par la société SICOMIN. La mise en œuvre est réalisée par infusion à température ambiante. Quinze couches de renforts ont été stratifiées à sec sur un moule, lequel est ensuite mis sous vide, après interposition d'un ensemble de tissus qui conditionne la fabrication et sa qualité, à savoir, un tissu d'arrachage, un film perforé, un filet de drainage et un film de mise sous vide. La résine est injectée et migre à travers les tissus jusqu'à ce que la pièce soit totalement imprégnée puis elle est polymérisée. Les plaques obtenues ont 5 mm d'épaisseur avec un taux de renfort de 63%.

Les essais ont été effectués sur une fraiseuse Charlyrobot à commande numérique de référence CPR0705. Les efforts de coupe ont été mesurés à l'aide d'un dynamomètre Kistler 9257B à 4 capteurs piézo-électriques. Le dispositif expérimental est représenté dans la figure 1.

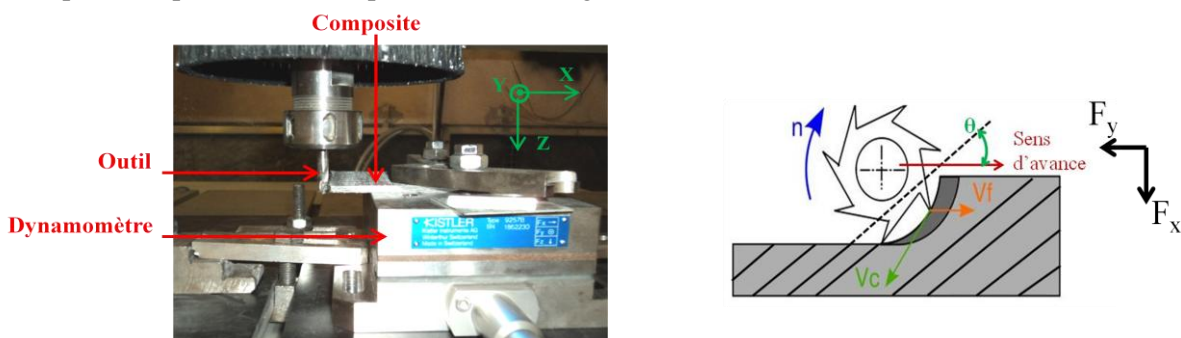


FIG. 1 – Dispositif expérimental (configuration en avalant)

L'opération de fraisage de profil (détournage) est réalisée sans lubrification avec une fraise 2 dents en carbure monobloc de diamètre 6 mm sur des éprouvettes de dimensions $(100 \times 100) \text{ mm}^2$. Cinq orientations de fibres ont été étudiées (0° , 15° , 30° , 45° et 90°) dans le cas du détournage en avalant et deux orientations (0° et 90°) au cours du détournage en opposition. Les orientations sont définies par rapport à la direction d'avance de l'outil. La figure 1 présente la configuration d'usinage en avalant. Les paramètres de coupe utilisés au cours des deux types de fraisage sont donnés dans le tableau 1.

Vitesse de rotation N (tr.min ⁻¹)	Vitesse d'avance V _f (mm.s ⁻¹)	Profondeur de passe a _p (mm)
8000	10	0,5
13500	30	1
20500	50	1,5
24000	70	2

TAB. 1 – Paramètres de coupe utilisés au cours du détourage

3 Résultats et analyses

Des exemples de résultats lissés obtenus par le dynamomètre sont donnés sur la figure 2. Chaque exemple représente l'évolution des forces de coupe F_x, F_y et F_z en fonction du temps. Il a été observé que les vibrations s'accroissent avec l'orientation des fibres.

Ces résultats permettent de calculer les moyennes des forces pour chaque essai de détourage. L'effort de coupe étudié est la racine carré de la somme quadratique des trois composantes, représentant l'effort résultant total de l'outil sur la matière (équation [1]).

$$F_c = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

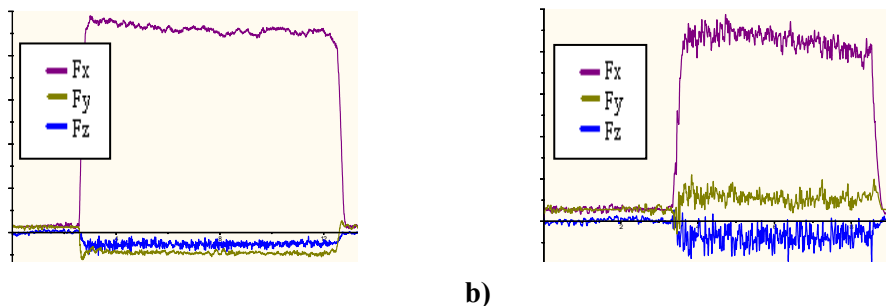


FIG. 2 – Exemples d'évolution des efforts de coupe en fonction du temps avec N= 8000tr/min, V_f= 10mm/s et a_p= 1mm pour a) θ=0° et b) θ=90°

3.1 Influence des paramètres de coupe

La figure 3a illustre l'influence de la vitesse d'avance sur l'effort de coupe F_c à vitesse de rotation de la broche N=8000 tr.min⁻¹ et profondeur de passe a_p=1mm fixes.

On note tout d'abord une tendance identique quelle que soit l'orientation des fibres : l'effort de coupe augmente linéairement et fortement avec la vitesse d'avance dans l'intervalle choisi. Il est par exemple multiplié par plus de 3 lorsque la vitesse passe de 10 à 70mm.s⁻¹, pour une orientation des fibres de 0°, et par plus de 2 pour une orientation de 90°. On peut raisonnablement faire l'hypothèse que plus la vitesse d'avance est importante, plus le volume de matière usiné par période de temps est important, d'où un effort de coupe F_c croissant avec cette vitesse.

D'autre part, on note également que les pentes des courbes tracées diminuent lorsque l'orientation des fibres augmente. L'importance de la vitesse d'avance reste notable, mais se trouve donc être minimisée lorsque l'on passe de fibres à 0° à des fibres à 90°. Cette tendance observée ici est à relier aux mécanismes d'endommagement intervenant au cours de la coupe, différents en fonction de l'orientation des fibres.

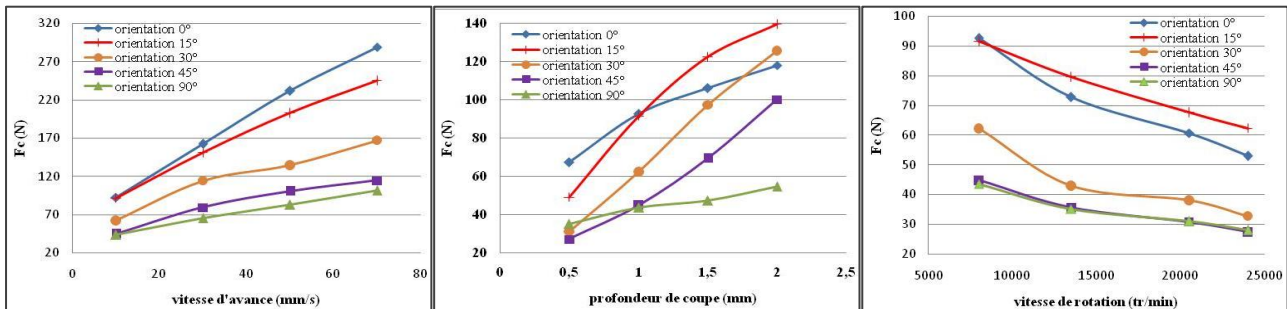
Enfin, il faut également relever que les courbes à 0° et 15° sont très proches, ainsi que celles à 45° et 90°. Au-delà de 45° et jusqu'à 90°, il semblerait donc que l'influence de l'orientation des fibres soit minimes. Il serait intéressant d'essayer de confirmer cette tendance en réalisant des essais entre 45° et 90° mais également au-delà de 90°.

La figure 3b illustre l'influence de la profondeur de passe sur l'effort de coupe F_c à vitesse de rotation de la broche N=8000 tr.min⁻¹ et vitesse d'avance V_f=10mm.s⁻¹ fixes.

Les tendances qui se dégagent de la figure 3b semblent déjà moins marquées et régulières que pour le paramètre vitesse d'avance étudié sur la figure 3a. On peut néanmoins noter que l'effort de coupe augmente fortement avec la profondeur de passe, jusqu'à l'orientation 45°. Pour les 4 orientations concernées, l'effort de coupe est environ triplé lorsque a_p passe de 0,5 à 2mm. Alors que pour l'orientation 90°, il est seulement multiplié par 1,5.

Ces tendances peuvent évidemment être expliquées par le fait qu'à profondeur de passe plus importante, volume de matière usiné plus important, d'où augmentation de l'effort de coupe.

Il paraît nécessaire d'approfondir cette étude autour des orientations comprises entre 0° et 15° , afin d'analyser plus finement l'allure des courbes observée. Il semble également intéressant de tracer une courbe intermédiaire entre 45° et 90° , et examiner à quelle orientation se situe la chute de l'effort de coupe. On peut d'ailleurs enfin observer que sur les 2 premiers points ($a_p=0,5\text{mm}$ et $a_p=1\text{mm}$), les efforts de coupe mesurés sont identiques pour les orientations 45° et 90° (comme sur la figure 3a), mais cette observation ne peut être prolongée au-delà de 1mm de profondeur de passe.



a) ($N = 8000$ tr/min et $a_p = 1\text{mm}$) b) ($N = 8000$ tr/min et $V_f = 10\text{mm/s}$) c) ($V_f = 10\text{mm/s}$ et $a_p = 1\text{mm}$)

FIG. 3 – Evolution de l'effort de coupe au cours du détourage en avalant en fonction a) de la vitesse d'avance b) de la profondeur de passe et c) de la vitesse de rotation

La figure 3c illustre l'influence de la vitesse de rotation de la broche sur l'effort de coupe F_c à profondeur de passe $a_p=1\text{mm}$ et vitesse d'avance $V_f=10\text{mm.s}^{-1}$ fixes.

On retrouve ici des tendances marquées assez nettement, à l'image des observations faites sur la figure 3a. A contrario des figures 3a et 3b, on observe cette fois-ci une diminution de l'effort de coupe avec l'augmentation de la vitesse de rotation de la broche. L'influence majeure est observée pour l'orientation 0° , puisque l'effort est divisé par près de 2 lorsque la vitesse N passe de 8000 à 24000 tr.min^{-1} . Pour l'orientation 90° , l'effort n'est plus réduit que par 1,5.

Il est admis en usinage des matériaux métalliques que l'augmentation de la vitesse de rotation de la broche facilite l'enlèvement de matière. La figure 3c confirme donc cette tendance pour les matériaux composites.

Enfin, à l'instar de la figure 3a, on note que les évolutions de l'effort de coupe pour les orientations 0° et 15° sont proches, et elles sont même identiques pour les orientations 45° et 90° . L'orientation des fibres semble donc n'avoir aucune influence au-delà de 45° lorsque N varie.

3.2 Influence de l'orientation des fibres

L'étude bibliographique [1, 6] a montré l'influence prépondérante de l'orientation des fibres θ sur les efforts de coupe. Il paraissait donc intéressant de confirmer cette observation en détourage. Les figures 4a, 4b et 4c illustrent l'influence de l'orientation des fibres sur l'effort de coupe F_c , respectivement pour différentes valeurs des paramètres de coupe V_f , a_p et N .

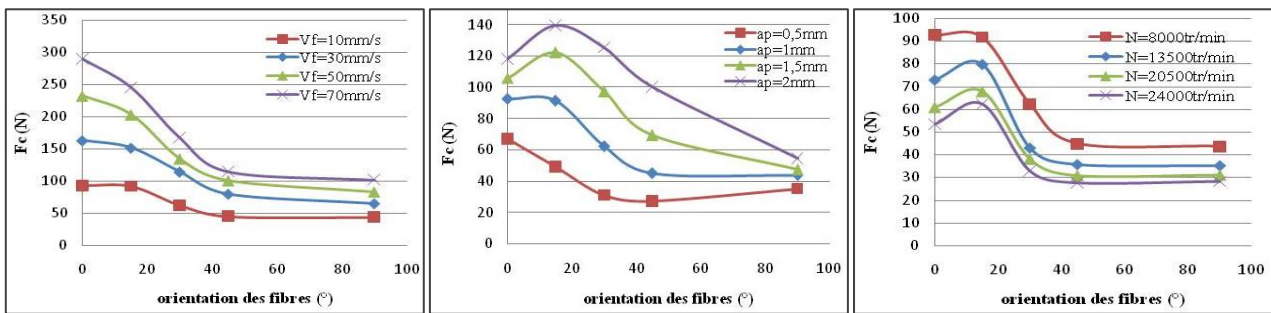
On peut décomposer la quasi-totalité des courbes tracées en 3 zones : la première s'étend entre les orientations 0° et 15° , la deuxième entre 15° et 45° et la troisième entre 45° et 90° . En effet, on constate d'abord que l'orientation 15° semble jouer un rôle très particulier. De la même manière, en exceptant la courbe 4b avec $a_p=2\text{mm}$, il apparaît que l'influence de l'orientation devient réduite voire nulle au-delà de 45° . S'il est difficile à l'heure de l'étude d'avancer une explication définitive, il sera nécessaire de creuser plus avant cette observation en effectuant par exemple des mesures d'effort pour des orientations comprises entre 45° et 90° et en analysant l'endommagement pour ces orientations.

Concernant la courbe 4a, on peut observer une décroissance de l'effort F_c jusqu'à l'orientation 45° , et on retrouve que plus la vitesse d'avance est élevée, plus l'orientation des fibres a de l'importance sur l'effort.

Sur la figure 4b, on remarque que plus la profondeur de passe est élevée, plus l'orientation à 15° joue un rôle de rupture de tendance.

Quelle que soit la vitesse de rotation de la broche, on observe sur la figure 4c les 3 zones déjà explicitées, en fonction de l'orientation des fibres : croissance de l'effort jusqu'à 15° , décroissance jusqu'à 45° puis stagnation entre 45° et 90° .

Enfin, on peut clairement observer que pour les paramètres de coupe étudiés, leur influence sur l'effort résultant est minimisée pour une orientation des fibres à 90°.



a) ($N = 8000$ tr/min et $a_p = 1$ mm) b) ($N = 8000$ tr/min et $V_f = 10$ mm/s) c) ($V_f = 10$ mm/s et $a_p = 1$ mm)

FIG. 4 – Evolution de l'effort de coupe en fonction de l'orientation des fibres au cours du détournage en avalant pour différentes a) vitesses d'avance b) profondeurs de passe et c) vitesses de rotation

Des observations macroscopiques permettent de mettre en évidence l'influence des fibres sur l'endommagement provoqué par l'usinage sur la pièce (figure 5). Pour une orientation de fibres à 0°, la rupture se fait le long de l'interface fibre/matrice. Lorsque θ croît, on remarque l'apparition de résidus de fibres mal coupées sur les surfaces supérieures et inférieures de la pièce. Leur densité augmente en même temps que l'orientation et la variation des paramètres de coupe influence également la présence ou non de résidus fibreux (par exemple, la densité de fibres augmente avec la vitesse d'avance).

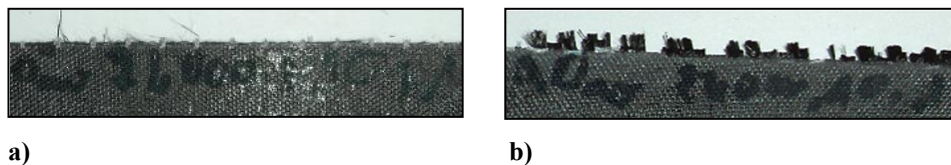
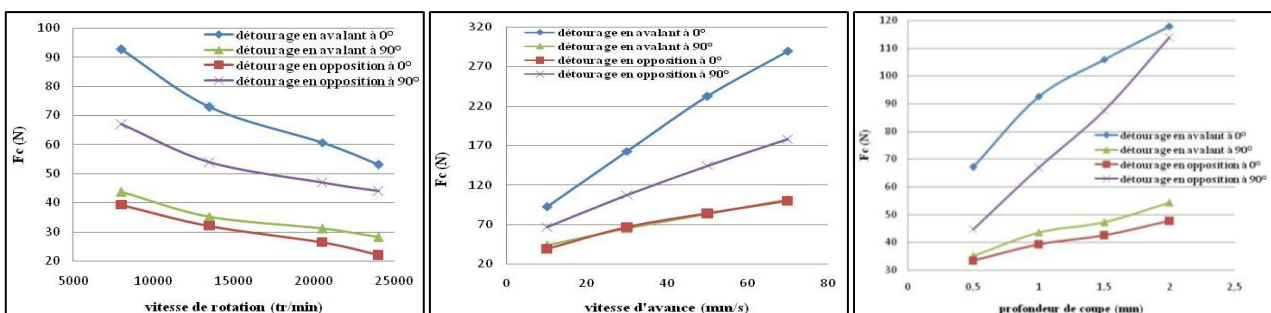


FIG. 5 – Surfaces usinées au cours du détournage du composite unidirectionnel carbone/époxy avec $N = 24000$ tr/min, $V_f = 10$ mm/s et $a_p = 1$ mm pour a) l'orientation 0° et b) l'orientation 90°.

3.3 Influence du procédé d'usinage

Les essais de détournage en avalant et en opposition des composites orientés à 0° et 90° dévoilent que la configuration d'usinage est un autre paramètre ayant une influence sur l'effort de coupe. La figure 6 illustre les résultats obtenus en fonction des trois paramètres de coupe étudiés. On retrouve sur cette figure les tendances d'évolution de F_c en fonction des paramètres de coupe observées sur les figures 3a, 3b et 3c. En effet, que ce soit lors du détournage en avalant ou en opposition, on constate que l'effort de coupe augmente avec V_f et a_p et diminue lorsque N augmente.



a) ($V_f = 10$ mm/s et $a_p = 1$ mm) b) ($N = 8000$ tr/min et $a_p = 1$ mm) c) ($N = 8000$ tr/min et $V_f = 10$ mm/s)

FIG. 6– Evolutions de F_c au cours de l'usinage en avalant et en opposition des composites à 0° et 90° en fonction de a) la vitesse de rotation b) la vitesse d'avance et c) la profondeur de passe

De plus, on remarque que les efforts obtenus au cours du détournage en opposition à 0° coïncident fortement avec ceux obtenus lors de l'usinage en avalant d'un composite à 90°. La tendance inverse ne se vérifie pas : les efforts pour un composite à 0° usiné en avalant suivent la même évolution que ceux obtenus pour un composite à 90° en opposition, mais les courbes présentent des niveaux d'effort sensiblement différents.

Des études complémentaires de l'endommagement du composite permettront de fournir des explications concernant les observations mentionnées ici.

4 Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer l'influence de 5 paramètres sur l'effort de coupe résultant du détournage d'un composite fibre carbone/résine époxy : l'orientation des fibres, la vitesse d'avance et de rotation de la broche, la profondeur de passe et le type de détournage utilisé (en avalant, en opposition).

Concernant les paramètres de coupe, on a pu mettre en évidence le fait que l'effort de coupe augmente avec la vitesse d'avance et la profondeur de passe. A contrario, il diminue lorsque la vitesse de rotation de la broche augmente. On a également pu noter que ces paramètres de coupe ont moins d'influence sur l'effort à mesure que l'orientation des fibres augmente.

L'orientation des fibres engendrent des états de surface différents sur la pièce usinée, qu'il sera nécessaire d'analyser plus précisément. On a pu remarquer que 3 zones se dessinaient sur les courbes représentant l'effort en fonction de l'orientation des fibres : entre 0° et 15°, l'effort croit ou stagne dans la très grande majorité des cas, puis il diminue fortement entre 15° et 45°. A partir de 45°, dans la plupart des observations, on a noté que l'orientation des fibres ne semble plus avoir d'influence sur l'effort de coupe. On a enfin mentionné que l'effort est minimal quel que soit le cas pour une orientation de fibres de 90°.

Concernant le type de détournage utilisé, les tendances d'évolution de l'effort de coupe en fonction des paramètres de coupe précédemment mentionnées ont été validées. On a également pu remarquer qu'usiner un composite à 0° en opposition engendrait des efforts très similaires à ceux obtenus pour un composite à 90° en avalant.

Afin de pouvoir expliquer les phénomènes observés, il apparaît nécessaire d'approfondir l'étude de l'endommagement du composite après usinage, en mettant en œuvre des essais C-scan, des mesures d'état de surface et de champs de déformation. Des investigations complémentaires seront également menées sur l'influence de la géométrie et de la nuance de l'outil utilisé. Une comparaison précise sur l'influence des paramètres de coupe sera réalisée entre le procédé de détournage et la coupe orthogonale 2D. Enfin, cette étude doit permettre à terme d'améliorer sensiblement les conditions d'usinage des composites en perçage, procédé largement employé dans l'industrie aéronautique pour l'assemblage des pièces.

Remerciements

Des remerciements sont à adresser à l'UTC de Compiègne pour son assistance pour la fabrication des plaques en composite et à la région Picardie pour son soutien financier.

Références

- [1] Wang D. H., Ramulu M. et Arola D., Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: Unidirectional laminate, *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 35, No. 12, 1623-1638, 1995.
- [2] Wang X. M. et Zhang L.C., An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics, *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 43, 1015-1022, 2003.
- [3] Bhatnagar N., Ramakrishnan N., Naik N. K. et Komanduri R., On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates, *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 35, No. 5, 701-716, 1995.
- [4] VenuGopalaRao G., Mahajan P. et Bhatnagar N., Three-dimensional macro-mechanical finite element model for machining of unidirectional-fiber reinforced polymer composites, *Materials Science and Engineering A* 498, 142-149, 2008.
- [5] Santo L., Caprino G. et De Iorio I., Cutting Forces and Cut Quality in Orthogonal Cutting of Unidirectional Carbon Fibre Reinforced Plastics, *Integrated Des. and Proc. Technol.*, IDTP 5, 221-228, 1998.
- [6] Iliescu D., Approches expérimentale et numérique de l'usinage à sec des composites carbone/époxy, thèse, ENSAM, 2008.