



HAL
open science

Etude de la qualité d'usinage lors du perçage d'un multi-matériau de type CFRP/Aluminium

Redouane Zitoune, Belkacem S. Elam Bouacif, Francis Collombet, Vijayan
Krishnaraj, Ondrej Zindulka, Alain Jolin

► **To cite this version:**

Redouane Zitoune, Belkacem S. Elam Bouacif, Francis Collombet, Vijayan Krishnaraj, Ondrej Zindulka, et al.. Etude de la qualité d'usinage lors du perçage d'un multi-matériau de type CFRP/Aluminium. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.101. hal-00598147

HAL Id: hal-00598147

<https://hal.science/hal-00598147>

Submitted on 4 Jun 2011

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 de la qualité d'usinage lors du perçage d'un multi-matériau de type CFRP/Aluminium

Study of the machining quality during drilling of composite material and aluminium stack

Redouane Zitoune¹, Belkacem S. Elam Bouacif¹, Francis Collombet¹, Vijayan Krishnaraj¹, Ondrej Zindulka², Alain Jolin³

1 : Université de Toulouse; INSA, UPS, Mines Albi, ISAE; ICA (Institut Clément Ader); 133, avenue de Rangueil, F-31077 Toulouse, France

2 : SHM, s.r.o. Prumyslova, 3 CZ - 78701, Sumperk, Czech Republic,

3 : LATECIS, 1 Avenue Pierre Georges Latécoère- 31570 Sainte Foy d'Aigrefeuille, France

redouane.zitoune@iut-tlse3.fr

Résumé

Dans cette étude, un matériau sandwich issu d'un empilement de plaque composite carbone/époxy et plaque en alliage aluminium a été percé à sec. L'influence des paramètres de coupe (vitesse d'avance et vitesse de rotation) sur la qualité d'usinage et sur la formation du copeau a été analysée. Les outils utilisés sont en carbure de tungstène, avec et sans revêtement. Le revêtement est de type nanocristallin référencé nc-CrAlN/a-Si₃N₄. Les résultats expérimentaux montrent que la forme et la taille des copeaux sont fortement influencées par le choix de la vitesse d'avance. Les efforts de poussée générés lors du perçage du composite sont de 10 % à 15 % plus faibles avec un outil revêtu que ceux obtenus avec un outil non revêtu. Cependant les efforts de poussée dans l'aluminium sont 50 % plus faibles avec des outils revêtus comparés aux efforts générés par des outils non revêtus. Les outils revêtus permettent de réaliser des trous dans les plaques composites et aluminium avec des rugosités de 50 % meilleures à celles obtenues avec des outils non revêtus.

Mots clés : Perçage, revêtement nano composite, Multi-matériau, effort de poussée, état de surface.

Abstract

In this study, a sandwich structure made of carbon fibre reinforced plastics and aluminium alloy was drilled without cutting fluid. The influence of the machining parameters (spindle speed and feed rate) on the holes quality as well as the chip formation were analyzed. Tools used for drilling are made of tungsten carbide, with and without coating. The coating is nano-crystalline type referred to as nc-CrAlN/a-Si₃N₄. The experimental results show that the shape and the size of the chips are strongly influenced by the choice of the feed rate. The thrust force generated during drilling of the composite plate with coated tools is 10 % to 15 % less compared with the thrust force generated during drilling tools without coating. Moreover, the thrusts forces in the aluminium are 50% less with coated drills compared to thrust force generated without coated drills. Also the nano-coated drills make it possible to carry out holes in the composite plates and aluminium with surface roughness 50 % better compared with those obtained with standard tools.

Keywords: Drilling, Nano composite coating, Multi-material, Thrust force, Surface finish.

1. Introduction

L'utilisation des matériaux composites à base de fibres de carbone dans le domaine aéronautique est en croissance constante. Dans un avion commercial comme l'A380 ou le Boeing 7E7, ces plaques composites sont aménagées sous la forme de panneaux sandwichs avec des empilements multimatériaux de type carbone/Carbone, carbone/aluminium, carbone/titane ... Du fait des propriétés mécaniques différentes entre les matériaux constituant les panneaux sandwichs, leur usinabilité reste un problème ouvert. Dans la première partie de cette introduction, on résume les différents travaux de la littérature relatifs aux problèmes liés à l'usinage des matériaux composites et les solutions proposées. Dans la deuxième partie, on récapitule les problèmes majeurs liés à l'usinage d'aluminium. En conclusion, on adresse les problèmes liés plus particulièrement à l'usinage des multi matériaux tels que carbone/aluminium, carbone/titane et on présente les solutions proposées.

L'usinage des matériaux composites à base de fibres longues avec un outil hélicoïdal à deux lèvres (utilisé pour l'usinage des matériaux métalliques) fait apparaître des dommages qui nuisent à la durée de vie des assemblages boulonnés ou rivetés. En effet pour des raisons économiques, les forets hélicoïdaux en carbure à deux lèvres sont utilisés dans le cas du perçage des composites. Dans la littérature, la classification des défauts liées à l'opération du perçage est effectuée suivant leurs zones d'apparition : à l'entrée du trou - par la décohésion du pli supérieur du stratifié, sur la paroi du trou - par l'arrachement de fibres et la dégradation de la résine et en sortie du trou - par la décohésion du dernier pli - (due principalement à l'effort de poussée de l'outil de coupe) [1]. Dans le domaine aéronautique, ces défauts de perçage sont responsables du rejet de presque 60 % des pièces du fait du non respect du cahier des charges (problèmes de diamètre, de rugosité, circularité ...). D'après les travaux de [2], le défaut de délaminage en sortie de trou influe d'une façon considérable sur la durée de vie d'une pièce sollicitée en fatigue. Ce délaminage sous l'effet d'une charge /décharge se propage jusqu'à la rupture finale de la pièce.

D'après les travaux de [3-4], le défaut qui se situe sur la paroi du trou est affecté par l'interaction entre les arêtes de coupe du foret et la matière usinée. Pour l'analyse de ce défaut, [1] et al ont proposé une stratégie consistant à simplifier l'étude par l'analyse de la coupe orthogonale sur des stratifiés unidirectionnels. Avec cette stratégie un dialogue essai/calcul a pu être établi. Les modélisations numériques et les analyses des mesures de champs par corrélation d'images sont en bon accord avec les observations expérimentales [3]. Les travaux [3-4] montrent que la qualité de l'usinage est affectée d'une part, par le choix de la profondeur de coupe et d'autre part, par l'angle relatif θ entre l'orientation des fibres et la direction de la vitesse de coupe. Pour des valeurs de θ comprises entre -45° et 90° , des dommages sont observés sur les pièces usinées. Dans ce cas, ces endommagements sont liés principalement à la rupture des fibres qui s'effectue par flexion et cisaillement des fibres de carbone [4-5]. Des dommages sous forme de carbonisation de résine sont observés sur la paroi du trou lors du perçage des plaques composites en carbone/époxy. Ce phénomène de carbonisation est lié principalement à la faible conductivité thermique des composites.

Contrairement aux matériaux composites, l'enlèvement de la matière lors de l'usinage de l'aluminium s'effectue principalement par plastification (zone de cisaillement primaire) puis cisaillement de la matière. Dans le cas du perçage de l'aluminium et de ses alliages, le problème principal rencontré est le phénomène du collage de l'aluminium sur les arêtes principales et les goujures de l'outil de coupe. Ce phénomène de collage est responsable de l'usure prématurée de l'outil de coupe et du mauvais état de surface au niveau de la paroi du trou ainsi que les variations dans le diamètre du trou en fonction du nombre de trous usinés. Avec des faibles vitesses de coupe (inférieure ou égale à 25 m/min), le collage de l'aluminium se manifeste au niveau de la face de coupe ainsi que l'arête de coupe principale. Cela modifie le rayon d'acuité de cette dernière [6, 7, 8]. Une des solutions pour s'affranchir des problèmes liés à l'usinage de l'aluminium et ses alliages est d'augmenter les vitesses de coupe. Cependant l'usinage avec des vitesses de coupe très élevées (par exemple de l'ordre de 300 m/min) engendre des augmentations significatives de la température de coupe (supérieure à 300°C). À partir de cette température, une réaction chimique entre l'aluminium et le cobalt se produit pour former des microsoudures de l'aluminium sur les arêtes de coupe de l'outil (par diffusion).

Du fait des propriétés mécaniques différentes des matériaux constitutifs, il est difficile d'assurer une bonne tolérance du diamètre usiné lors du perçage des plaques sandwichs. De plus lors du perçage à sec, on rencontre un problème lié à l'évacuation des copeaux ainsi que le phénomène de collage de l'aluminium et du titane sur les parties actives de l'outil. Des essais d'usinage réalisés sur un multi matériau de type graphite bismaléimide (Gr/Bi) et titane (Ti) ont montré la présence de dégradations de la résine à l'interface Gr/Bi - Ti (sortie du trou du composite Gr/Bi et l'entrée du trou du titane Ti). En raison de la faible conductivité thermique du titane lors du perçage à sec, l'évacuation des flux de chaleur générés par les interactions outil/matière/copeaux s'effectue en grande partie par l'outil de coupe et les copeaux. Le contact de ces derniers avec la matrice du composite engendre des dégradations thermiques de la résine dues au niveau élevé de la température des copeaux de titane (Ti) et de l'outil de coupe [9]. Les travaux [10, 11] ont montré que, pour réaliser des trous avec une qualité acceptable lors de du perçage d'un matériau de type Gr/Bi-Ti en utilisant un outil en carbure de tungstène, il est nécessaire de travailler avec une faible vitesse de coupe et une faible vitesse d'avance. Cependant pour le perçage avec un outil de type HSS-Co, il est plus intéressant de choisir une faible vitesse de coupe et une grande vitesse d'avance. Dans le cas du perçage des plaques sandwichs de type carbone

époxy/aluminium (2024), les travaux de [12] ont montré qu'une faible vitesse d'avance de perçage permet d'assurer une bonne rugosité dans l'aluminium. Cependant on génère alors des copeaux continus qui peuvent endommager la paroi du trou composite pendant leur évacuation. De plus, ces copeaux accrochent le corps de l'outil et peuvent également provoquer des dommages lorsqu'ils se trouvent en contact avec le pli supérieur de la partie composite de l'assemblage multi matériaux [13]. Lorsqu'on envisage d'automatiser le processus de perçage et de rivetage des panneaux sandwichs, l'obtention de copeaux discontinus est souhaitable. Dans cette situation, l'aspiration des copeaux est facilitée. Cependant, l'augmentation de la vitesse d'avance de l'outil de coupe conduit à l'augmentation des valeurs de la rugosité des surfaces usinées des deux matériaux. A titre d'exemple, lorsque la vitesse d'avance augmente de 0.05 mm/tr à 0.15 mm/tr, les valeurs de la rugosité mesurées dans les trous de la plaque d'aluminium passent de 0.43 μm à 0.98 μm . Les valeurs de la rugosité mesurées dans la plaque carbone/époxy passent de 3.3 μm à 6.93 μm . Ces différences sont liées principalement à la discontinuité de la coupe générée par des vitesses d'avance élevées. Le besoin industriel consiste à percer jusqu'à la dernière couche du multi matériau dans une opération unique de façon à ce que les pièces n'aient pas besoin d'être désassemblées, ébavurées puis rassemblées. Les opérations d'ébavurage représentent presque 30 % du coût d'usinage de certaines pièces structurales [14].

Afin d'assurer un usinage avec des copeaux discontinus tout en garantissant un état de surface acceptable, une campagne d'essais de perçage est réalisée pour le perçage d'un multi matériau de type CFRP/aluminium. Les outils utilisés dans le cadre de cette étude sont de type hélicoïdaux en carbure de tungstène (K20) avec et sans revêtement. Le revêtement utilisé est de type nano composite réalisé par la société tchèque SHM. L'influence des paramètres de coupe (vitesse de rotation et vitesse d'avance de l'outil) sur les efforts de coupe générés ainsi que l'état de la surface usinée sont étudiés. L'influence du nombre de trous percés sur l'évolution de l'effort de poussée et de la rugosité dans le composite et dans l'aluminium est ainsi analysée pour les outils revêtus et non revêtus.

2. Essais d'usinage

Les plaques sandwichs étudiées sont composées d'une plaque composite en carbone/époxy et d'une plaque d'aluminium. La plaque composite usinée est issue d'une nappe unidirectionnelle avec une séquence d'empilement quasi-isotrope de 16 plis et une épaisseur de 4.25 mm. La plaque isotrope est en alliage d'aluminium utilisée dans le domaine aéronautique avec la référence Al 2024. Le pourcentage des éléments d'addition est le suivant : Al 93.5%, Si 0.5%, Cu 3.8-4.9 %, Mg 1.2 – 1.8 %, Cr 0.1%. Le perçage est effectué sur une machine à commande numérique développée par la société LATECIS dans le cadre du projet de recherche intitulé OPERA (Outillage Perçage Encollage et Rivetage Automatisé) voir Figure 1-a. L'acquisition des efforts de coupe est réalisée à l'aide d'un capteur d'effort quatre axes de type Kistler (cf. Figure 1-b).

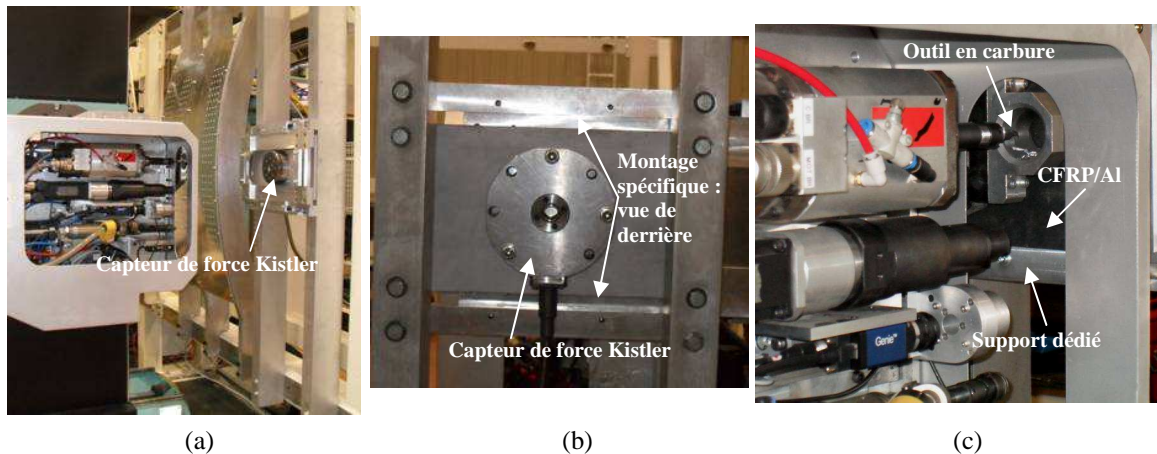


Fig. 1 : (a) Montage expérimental, (b) fixation du capteur de force sur la colonne de la machine CN, (c) vue de face du montage.

Le capteur de force Kistler est relié à un amplificateur de charge de type 5019. Le signal de sortie de l'amplificateur est transformé en force de coupe grâce à un ordinateur qui permet l'acquisition et l'enregistrement des signaux (forces et moment de coupe). La pièce sandwich à usiner est encastrée sur un support dédié (cf. Figure 1-c). Sur ce dernier, un trou de 18 mm est usiné afin de laisser passer le foret et d'empêcher la flexion de la plaque sandwich multimatériaux. Ce support est encastré sur une colonne rigide de la machine CN par l'intermédiaire du capteur d'effort à l'aide de quatre vis de type CHC. Les outils utilisés dans cette étude sont en carbure de tungstène micro grain de nuance K20 avec un diamètre 6 mm et un angle de pointe de 118 °. Une partie de ces outils sont enrobés d'un revêtement nano composite de type nc-CrAlN/a-Si₃N₄ réalisé par la société tchèque SHM. Ce type de revêtement se

présente sous une forme nanocristalline. Il est formé par des monocristaux de dimension nanométrique de 10 nm. Ces derniers sont noyés dans une résine céramique de type Si₃N₄. L'ensemble constitue un revêtement nanocomposite se caractérisant par une dureté élevée.

Les essais de perçage réalisés sont organisés suivant un plan d'expérience complet avec trois vitesses d'avance et trois fréquences de rotation (voir Tableau 1). Les conditions d'usinage utilisées sont mentionnées dans le Tableau 1.

Machine d'usinage	machine commande numérique avec une puissance de 10 kW
Plaque composite	CFRP de type T700M21 avec $V_f = 58\%$, épaisseur 4.25 mm
Plaque d'aluminium	Al 2024 avec une épaisseur de 3 mm
Outil de coupe	carbure de tungstène nuance K20, 6 mm de diamètre, 118 ° d'angle de pointe
Revêtement d'outil	nc-CrAlN/a-Si ₃ N ₄
Vitesse de rotation (tr/min)	1050, 2020 et 2750
Vitesse d'avance (mm/tr)	0.05, 0.1 et 0.15

Tableau 1 : Conditions d'usinage utilisées durant les essais de perçage.

3. Analyse des résultats

3.1 Formation des copeaux

L'analyse macroscopique sur la formation des copeaux a montré que la forme et la taille de ces derniers lors du perçage d'une pièce en CFRP ne sont pas influencées par le choix des paramètres de coupe. Cependant lors du perçage d'une pièce en aluminium, la forme et la taille des copeaux sont fortement influencées par la valeur de la vitesse d'avance de l'outil de coupe et cela quelque soit le type de l'outil de coupe utilisé (avec ou sans revêtement). La figure 2 représente l'influence de la vitesse d'avance sur la forme et la taille des copeaux d'aluminium après perçage avec des outils revêtus. On note que le perçage avec une faible vitesse d'avance ($f = 0.05$ mm/tr) favorise l'apparition des copeaux continus (copeau hélicoïdal conique et long). Cependant l'augmentation de la vitesse (de 1050 tr/min à 2750 tr/min) de rotation n'a pas montré une influence sur la forme et la taille copeaux. Les essais n'ont montré aucune différence lors de l'utilisation des outils revêtus comparant aux outils non revêtus sur la taille et la forme des copeaux conformément à [10].

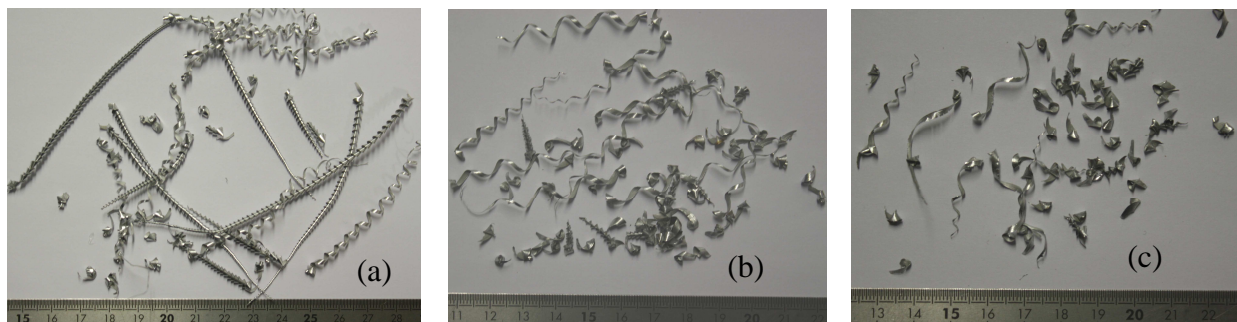


Fig. 2 : Influence des conditions d'usinage sur la forme des copeaux d'aluminium après perçage avec un outil revêtu avec : (a) $N = 2750$ tr/min, $f = 0.05$ mm/tr, (b) $N = 2750$ tr/min, $f = 0.1$ mm/tr, (c) $N = 2750$ tr/min, $f = 0.15$ mm/tr.

Lorsque les copeaux sont continus, le temps d'usinage augmente. En effet après chaque trou usiné, l'opérateur doit intervenir pour retirer les copeaux accrochés sur le corps de l'outil. Si les copeaux continus restent accrochés sur le corps de l'outil, deux problèmes peuvent apparaître. D'un côté, on ne peut pas assurer les opérations de perçage et rivetage d'une manière automatisée et d'un autre côté, on augmente les chances de faire apparaître des dommages en entrée du trou de la pièce composite du fait de l'interaction entre les copeaux en mouvement de rotation et la pièce composite dans le cas d'un contact entre ces derniers. L'observation visuelle de l'état des trous obtenus (en fonction des paramètres de coupe utilisés ainsi que les valeurs de diamètre des forets) n'a pas révélé la présence de délaminage en entrée et en sortie de trou des pièces composites. Egalement, aucune bavure n'a été observée en sortie de trou de pièces d'aluminium.

3.2 Evolution des efforts de poussée

La figure 3-a représente l'évolution de l'effort de poussée F_z enregistré dans l'aluminium et dans le composite en fonction de l'avance par tour après perçage avec un outil revêtu et un outil non revêtu. On note que les efforts de

poussée sont directement proportionnels aux vitesses d'avance pour les deux matériaux (CFRP et Al). On observe également que les efforts enregistrés dans l'aluminium sont deux à trois fois plus grands que ceux enregistrés dans le matériau composite. A titre d'exemple lors du perçage avec une fréquence de 2750 tr/min et avec une vitesse d'avance de 0.15 mm/tr et en utilisant un foret non revêtu, les efforts de poussée générés passent de 190 N dans le CFRP à 670 N dans l'aluminium.

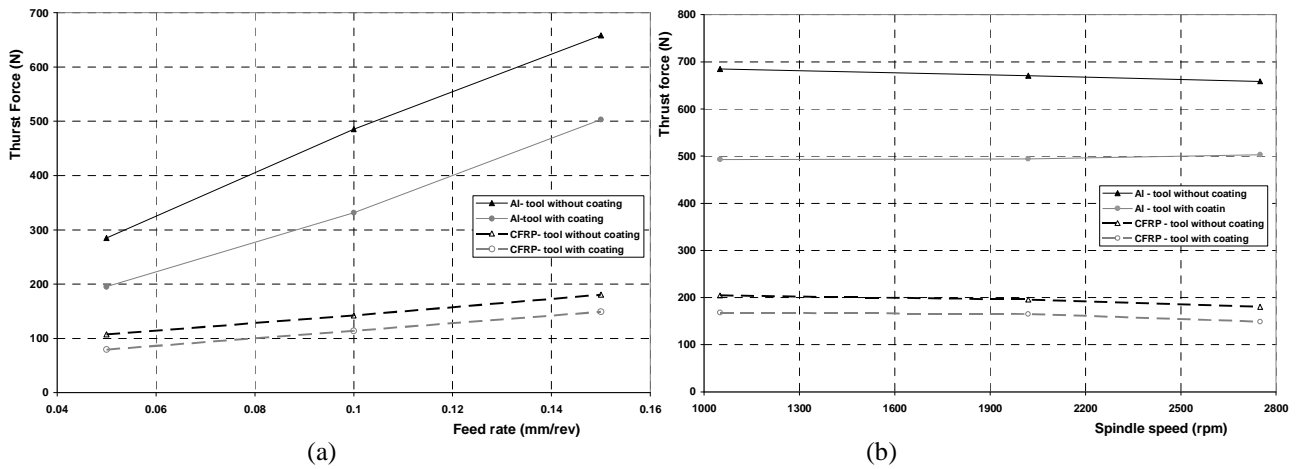


Fig. 3 : Influence des paramètres de coupe et du revêtement des outils sur les efforts de poussée dans le CFRP et dans l'aluminium avec : (a) influence de la vitesse d'avance pour une fréquence 2750 tr/min, (b) influence de la vitesse de rotation pour une avance de 0.15 mm/tr.

En ce qui concerne l'outil avec revêtement pour les mêmes conditions d'usinage, ces efforts de poussée passent de 160 N dans le CFRP à 500 N dans l'aluminium (voir figure 3-a). Plusieurs travaux [13] ont montré que l'effort de poussée F_z enregistré lors du perçage est influencé d'un côté, par la valeur de la pression spécifique générée par le contact entre le foret et le matériau à usiner et d'un autre côté, par la nature de l'affûtage de la pointe de l'outil. On constate aussi que ces efforts de poussée générés lors du perçage du composite sont peu affectés par la nature du revêtement des outils. Pour les mêmes paramètres de coupe, on observe que les efforts de poussée enregistrés lors du perçage du composites avec un outil non revêtu sont de 10 % à 15 % plus grands que ceux enregistrés lors du perçage avec un outil revêtu. Cependant, cet écart atteint les 50 % lors du perçage de l'aluminium. Cette différence peut s'expliquer par le fait que, le revêtement utilisé favorise la réduction des frottements entre la partie active de l'outil (surface de dépouille) et la surface usinée et entre les copeaux lors de leur génération et leur évacuation quand ils entrent en contact avec les faces de coupe et les goujures de l'outil de coupe. La figure 3-b montre l'évolution des efforts de poussée en fonction de la vitesse de rotation pour une avance 0.15 mm/tr pour les deux types d'outil étudiés. On note que la fréquence de rotation a peu d'influence sur l'effort de poussée F_z . Une légère diminution de cet effort est observée dans le cas de l'aluminium. A titre d'exemple lorsque la fréquence de rotation passe de 1050 tr/min à 2750 tr/min, une diminution de l'ordre de 4 % de l'effort F_z est enregistrée.

3.3 Analyse de la rugosité

La figure 4 illustre l'évolution de la valeur moyenne de la rugosité R_a en fonction de la vitesse d'avance pour une fréquence de rotation de 2750 tr/min et pour les deux types d'outil étudiés dans le cas d'une pièce en aluminium. On note que l'augmentation de la vitesse d'avance de l'outil de coupe conduit à une augmentation significative de la valeur de la rugosité quelque soit l'outil de coupe utilisé. A titre d'exemple, le passage d'une vitesse d'avance de 0.05 mm/tr à 0.15 mm/tr engendre une augmentation de la valeur de la rugosité de 0.43 μm à 0.94 μm lors d'utilisation d'un outil non revêtu. L'utilisation d'un outil revêtu conduit à l'amélioration de l'état de la surface des trous percés. Dans ce cas, les valeurs de la rugosité mesurée dans les trous d'une pièce d'aluminium (lorsque la vitesse d'avance passe de 0.05 mm/tr à 0.15 mm/tr) évoluent respectivement de 0.35 μm à 0.68 μm . Les même tendances sont retrouvées lors de la mesure de la rugosité dans les trous réalisés dans une plaque en carbone/époxy. Cependant, les valeurs de la rugosité mesurées dans des trous d'une plaque en CFRP restent nettement supérieures à celles mesurées dans des trous réalisés sur des plaques d'aluminium du fait du caractère multi-hétérogène du matériau composite. La nature hétérogène des matériaux composites et les effets d'orientation des fibres de carbone par rapport à la direction de la vitesse de coupe favorisent l'augmentation de la valeur de la rugosité.

L'analyse au microscope électronique de la pointe des outils de coupe, revêtus et non revêtus avant l'opération d'usinage, montre que les outils revêtus présentent un meilleur état de surface comparé à l'état de surface des outils non revêtus (voir Figure 5). Cette différence est liée au procédé de revêtement des outils qui nécessite un polissage particulier des outils avant l'opération de dépôt (PVD) de la couche de revêtement pour assurer une meilleure adhérence entre le substrat et la couche nanocristalline. De ce fait, l'usinage avec des outils revêtus améliore la qualité de surface de l'aluminium ou du composite. L'analyse au MEB des outils de coupe après usinage montre la présence d'une couche d'aluminium sur les arêtes de coupe ainsi que sur les goujures (voir Figure 6). Avec un grossissement plus

important de la zone de collage de l'aluminium sur les arêtes de coupe, on note qu'à l'interface arêtes de coupe/aluminium, il n'y a pas de phénomène de diffusion ou de d'oxydation (cf. Figure 6-c). Ce phénomène apparaît lorsque la température à l'interface atteint les 300 °C.

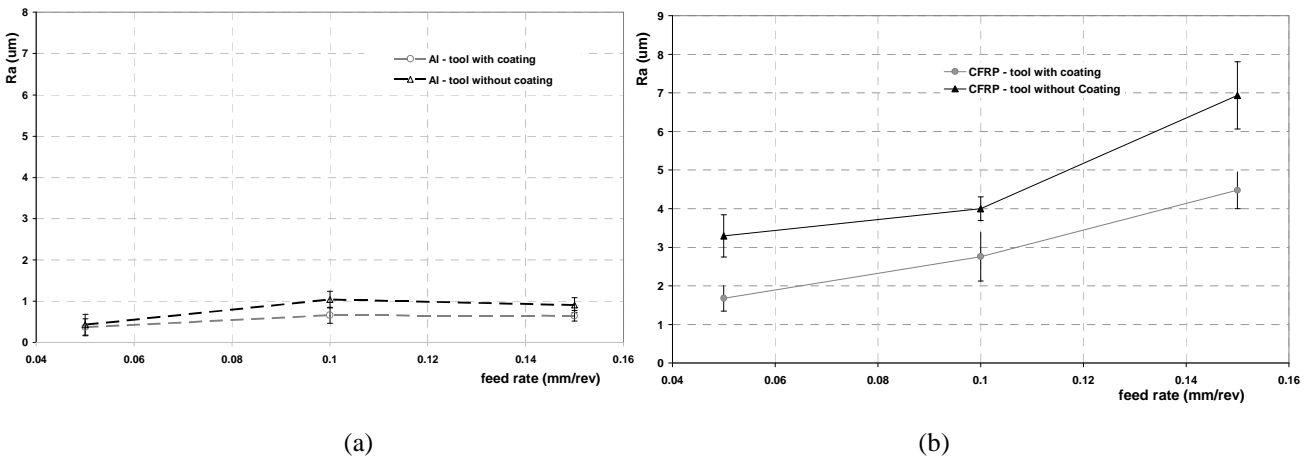


Fig. 4 : Evolution de la valeur de la rugosité des trous percés avec un outil revêtu et non revêtu en fonction de la vitesse d'avance avec : (a) dans l'aluminium et (b) dans le composite.

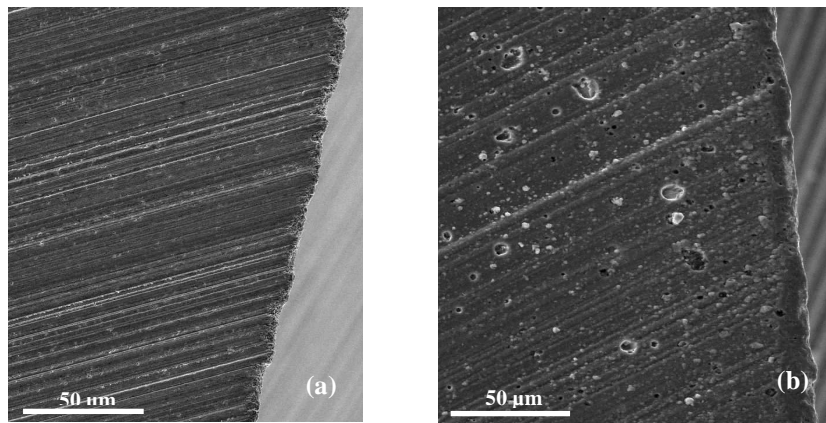


Fig. 5 : Vues au microscope électronique (MEB) de l'état de surface des arêtes de coupe des outils avant l'usinage avec : (a) outil sans revêtement et (b) outil avec revêtement.

On peut tirer les mêmes conclusions pour le perçage avec des outils revêtus (voir Figure 7). Bien qu'avec les outils revêtus on ait amélioré d'une façon remarquable les états de la surface, on n'a pas empêché le phénomène de collage sur les arêtes. Cette analyse apporte la preuve que l'utilisation d'une vitesse de rotation de 2750 tr/min permet de minimiser d'un côté, les efforts de poussée (dans l'aluminium et dans le composite) et d'un autre coté, la quantité de l'aluminium collé sur les arêtes de coupe des outils revêtus et non revêtus.

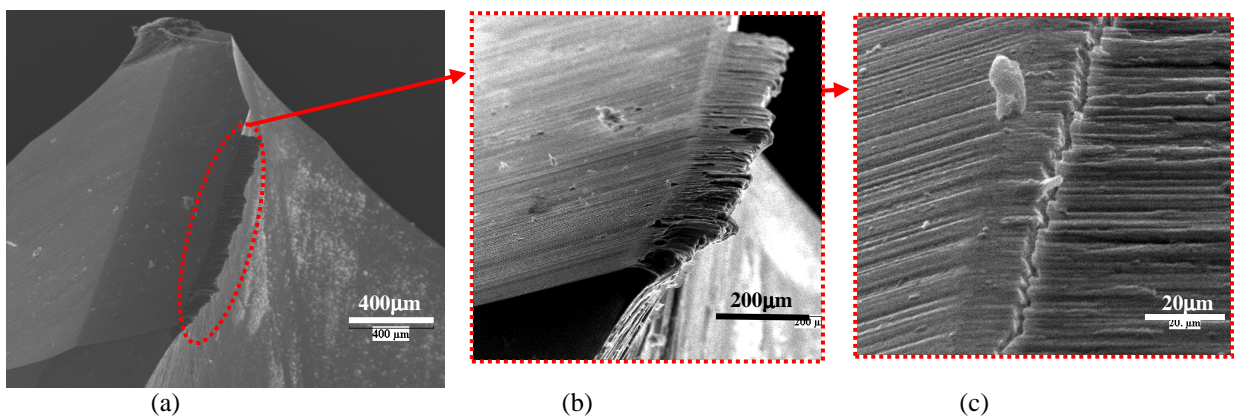


Fig. 6 : Photos MEB illustrant le collage de l'aluminium sur les arêtes de coupe d'un outil non revêtu après perçage avec une vitesse d'avance de 0.05 mm/tr et une vitesse de rotation de 1050 tr/min avec : (a) vue globale et (b) et (c) des zooms successifs.

Cependant l'usinage avec une vitesse de rotation de 2750 tr/min favorise l'apparition dans certains cas le délaminage en entrée du trou de la plaque composite. Pour cela l'usinage optimal doit être réalisé avec une vitesse d'avance de 0.1 mm/tr et une vitesse de rotation de 2020 tr/min.

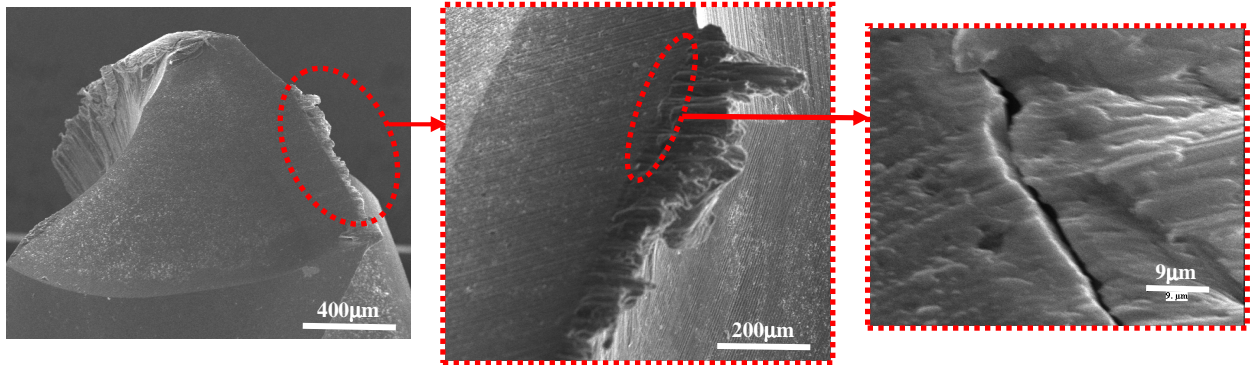


Fig. 7 : Photos MEB montrant le phénomène de collage de l'aluminium sur les arêtes de coupe d'un outil revêtu après perçage avec une vitesse d'avance de 0.05 mm/tr et une vitesse de rotation de 1050 tr/min avec : (a) vue globale et (b) et (c) des zooms successifs.

3.4 Influence de l'usure des outils de coupe sur les efforts de poussée

La figure 8 représente l'évolution des efforts de poussée mesurés dans l'aluminium et dans le matériau composite en fonction du nombre de trous usinés lors du perçage avec un outil revêtu et un outil non revêtu avec une vitesse d'avance de 0.1 mm/tr et une vitesse de rotation de 2020 tr/min. On constate que, après le perçage du 70^{ème} trou avec un outil revêtu, la force de poussée F_z augmente de 72 % dans le matériau composite (de 115 N à 198 N). Dans le cas du perçage avec un outil non revêtu, cette augmentation de la force F_z est plus importante. Elle est de l'ordre de 92 % (de 142 N à 278 N). Cette différence dans l'augmentation des efforts de poussée entre un outil revêtu et un outil non revêtu est liée principalement à la résistance à l'usure du revêtement utilisé.

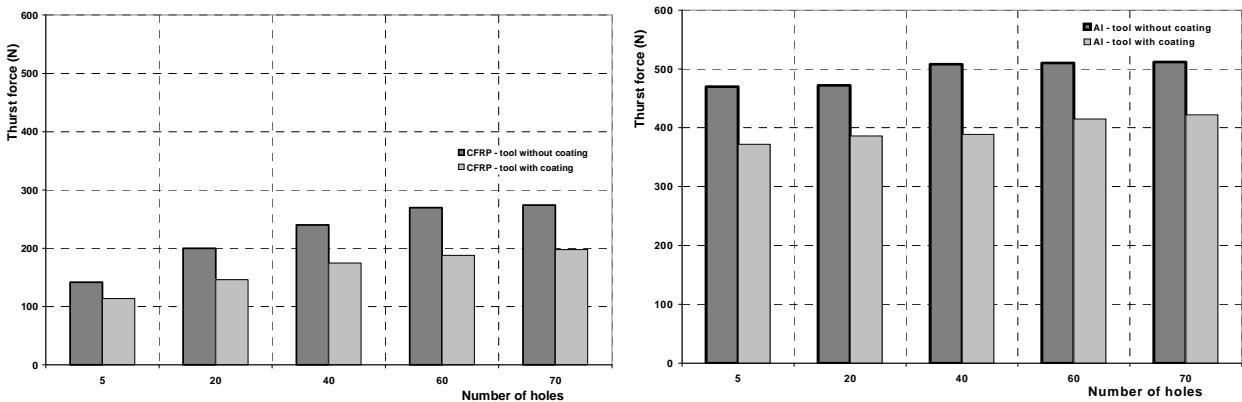


Fig. 8 : Influence du nombre de trou percé sur les efforts de poussée. (a) Force de poussée mesurée dans le CFRP, (b) Force de poussée mesurée dans l'aluminium.

Pour les efforts de poussée dans l'aluminium, ces derniers sont moins sensibles à l'effet d'usure produit jusqu'au 70^{ème} trou quel que soit le type d'outil utilisé. Pour les deux outils utilisés, on a enregistré une augmentation de l'ordre de 11 % de l'effort de poussée l'aluminium entre le premier trou et le dernier trou (70^{ème}). Cette légère augmentation de l'effort de poussée dans l'aluminium peut être la conséquence d'un début d'usure de l'outil de coupe au niveau de la face de dépouille. Comme l'augmentation des efforts de poussée dans le matériau composite (entre 72 % et 92 %) est beaucoup plus importante que celle enregistrée dans l'aluminium (aux alentours de 10 %), on peut supposer que l'usure de l'outil de coupe concerne l'acuité de l'arête de l'outil. Cette usure localisée a très peu d'influence sur le phénomène d'enlèvement de matière dans les matériaux isotropes car elle se situe au niveau d'une zone morte [12]. Cependant le phénomène d'enlèvement de matière dans les matériaux composites à base de fibres longues nécessite une acuité d'arête de coupe la plus faible possible (sans qu'elle ne fragilise l'arête de coupe). La figure 9 illustre l'état de l'outil de coupe revêtu après le perçage du 70^{ème} trou. Ces photos MEB ne montrent aucune usure au niveau de la face de dépouille, ce qui conforte notre hypothèse sur la présence de l'usure au niveau de l'acuité de l'arête de l'outil de coupe.

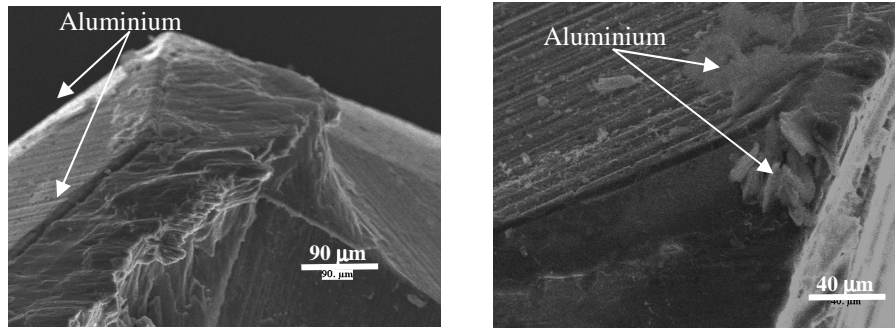


Fig. 9 : Photos MEB illustrant l'état de l'outil revêtu après le perçage du 70^{ème} trou avec : (a) détail de l'âme du foret, et (b) détail du bec de foret

4. Conclusion

Dans le cadre du perçage des matériaux sandwichs à base de CFRP/aluminium, l'étude expérimentale a montré que la forme et la taille des copeaux sont fortement influencées par le choix de la vitesse d'avance de l'outil de coupe. Pour assurer les opérations du perçage et rivetage d'une façon automatisée avec le système OPERA, il ne faut pas de copeau accroché sur le corps de l'outil de coupe et pas d'apparition de délaminage du composite en entrée du trou. Pour cela, il est nécessaire de percer avec une vitesse d'avance de 0.1 mm/tr et une vitesse de rotation de 2020 tr/min. Le perçage avec ces paramètres de coupe et l'utilisation d'un outil de coupe revêtu permettent de réduire d'une façon nette la rugosité des trous percés dans l'aluminium et dans le composite (plus de 50 %). Egalement, les outils revêtus permettent de minimiser les efforts de poussée dans les plaques d'aluminium et dans les plaques composites. La réduction des efforts de poussée dans les plaques d'aluminium atteint les 50 % comparés seulement aux 15 % lors du perçage des plaques composites. Dans les étapes à venir, on va travailler sur la géométrie de la pointe de l'outil afin de générer des copeaux discontinus avec des faibles vitesses d'avance tout en gardant une rugosité acceptable.

5. Références

- [1] W. KOËNIG, Ch. WULF, H. GRASS, H. WILLERSCHIED, « Machining of fibre reinforced plastics », *Ann CIRP*, 34, pp. 537-47, 1985.
- [2] P. ERIK, E. INGVAR, Z. LEIF, « Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates ». *Composite Part A*, Vol. 31, pp. 141-51, 1997.
- [3] R. ZITOUNE, F. COLLOMBET, et al, « Experiment-calculation comparison of the cutting conditions representative of the long fibre composite drilling phase ». *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp. 455-466, 2005.
- [4] R. ZITOUNE, J.N. PERIE, F. COLLOMBET, et al, « Coupe orthogonale sur composites fibres longues carbone/époxy : comparaison entre mesures de champs et calculs numériques ». *Colloque National de Photo Méca. 2004, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux*, CD Rom, ISBN 2-9511591 pp. 3-7, 2004.
- [5] D. AROLA, M. RAMULU, H. WANG, « Chip Formation in Orthogonal Trimming of Graphite / Epoxy Composites ». *Composites: Part A*, Vol. 27A, pp. 121-133, 1996.
- [6] B. CHAMBERLAIN, «Metals Handbook». *ASM*, 1998.
- [7] G. LIST, et al, «Wear behaviour of cemented carbide tools in dry machining of aluminium alloy ». *Wear*, Vol. 259, pp. 1177-1189, 2005.
- [8] M. NOUARI, et al, « Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys ». *Int. J. of Machine Tools & Manuf.*, Vol. 45, pp. 1436-1442, 2005.
- [9] M. RAMULU, T. BRANSON, D. KIM, « A study on the drilling of composite and titanium stacks ». *Composite Structures*, Vol. 54, pp. 67-77, 2001.
- [10] D. KIM, M. RAMULU, « Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy stacks ». *Composite structures*, Vol. 63, N° 1, pp. 101-114, 2004.
- [11] D. KIM, M. RAMULU, « Machinability of titanium/graphite hybrid composites in drilling ». *Trans. NAMRI/SME*, Vol. 33, pp. 445-452, 2005.
- [12] R. ZITOUNE, V. KRISHNARAJ, F. COLLOMBET, « Study of Drilling of Composite Material and Aluminium Stack ». *Composite Structures*, Vol. 92, Issue 5, pp. 1246-1255, 2010.
- [13] V. KRISHNARAJ, R. ZITOUNE, F. COLLOMBET, « Investigations on Drilling of Multimaterial and Analysis by ANN ». *Key Engineering Materials; Advances in Materials Processing IX*, Vol. 443, pp. 347-352, 2010.
- [14] A. MIGUEL, G. JOEL, et al « Strategies for burr minimization and cleanability in aerospace and automotive manufacturing ». *SAE transactions, ISSN 0096-736X*, Vol. 114, No 1, 2005.
- [15] R. ZITOUNE, F. COLLOMBET, « Influence of machining quality on composite part manufacturing ». *Drilling of Composite Materials*, Series: Materials and Manufacturing Technology Nova Publishers. In: Davim JP, editor 2009.