



HAL
open science

Usinage des Composites par Jet d'eau Abrasif

François Cénac, Francis Collombet, Redouane Zitoune, Michel Déléris

► **To cite this version:**

François Cénac, Francis Collombet, Redouane Zitoune, Michel Déléris. Usinage des Composites par Jet d'eau Abrasif. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.163. hal-00597503

HAL Id: hal-00597503

<https://hal.science/hal-00597503>

Submitted on 1 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.

Usinage des Composites par Jet d'eau Abrasif

Composite milling Abrasive Water-Jet

François Cénac^{1,2}, Francis Collombet¹, Rédouane Zitoune¹ et Michel Déléris²

1 : Université de Toulouse, INSA, UPS, Mines Albi, ISAE, ICA (Institut Clément Ader), Groupe MSC,
IUT P. Sabatier, dépt. GMP, 133C Av. de Rangueil, 31077 Toulouse CEDEX 4
e-mail : prénom.nom@iut-tlse3.fr

2 : JEDO Technologies, Rue du Chêne Vert - BP 78204 - 31682 Labège
e-mail : fcenac@jedotechnologies.net

Résumé

Le protocole expérimental de fraisage par jet d'eau abrasif obtenu sur aluminium est adapté aux matériaux composites. On met en exergue deux différences majeures liées à l'effet du JEA entre les composites et l'aluminium que sont l'usinabilité et les variabilités. L'usinabilité des matériaux composites étant plus grande que celle de l'aluminium pour le JEA, on propose des plages de paramètres différentes pour les composites, du fait des limitations des machines standard de production. On explique ensuite que la variabilité de l'épaisseur d'une pièce composite ne permet pas de réaliser les mesures au pied à coulisse comme avec l'aluminium. Une machine de mesure par analyse d'images est donc utilisée. On établit plusieurs modèles concernant d'une part, le débit d'abrasif optimal en fonction de la pression, du diamètre de buse et de la profondeur usinée et d'autre part, la vitesse d'avance en fonction de la pression, du diamètre de buse, du ratio de débit d'abrasif optimum et de la profondeur. On crée un modèle unifié applicable aux deux matériaux et on illustre la pertinence du procédé d'usinage et des modèles identifiés en présentant des usinages de réparation de type step lap et scarf.

Abstract

The experimental protocol of Abrasive Water Jet milling of aluminum is adapted to composite materials. Two major differences are emphasized related to the AWJ effect between composites and aluminum which are machinability and variability. As the composite material AWJ-machinability is larger than that of aluminum, we propose to modify the experimental domain in order to respect the maximum feed rate of the standard AWJ cutting machine. We also present that the thickness variability of a composite part does not allow the use for measurements with the caliper as with aluminium. A machine of measurement by images analysis is therefore used. It leads to several models concerning on one side, the optimal abrasive flow versus pressure, the diameter of tube and machined depth, and on the other side, the feed rate versus the pressure, the tube diameter, the ratio of abrasive optimum flow and the required depth. To conclude, we identify an unified model for the two materials and we illustrate the reliability of the machining process and the models by presenting AWJ-machined step-lap and scarf repair on composites.

Mots Clés : Jet d'eau abrasif, Composite, Usinage non débouchant.

Keywords: Abrasive water Jet, Composite, Blind machining.

1. Introduction

La technologie jet d'eau abrasif (JEA) utilise un jet d'eau à des vitesses de plusieurs centaines de mètres par seconde pour fournir de l'énergie cinétique à des particules abrasives [1] [2]. Le jet d'eau à grande vitesse est obtenu par le passage de l'eau sous une pression de plusieurs milliers de bars au travers d'une buse dont le diamètre d_b est de quelques dixièmes de millimètres. Les particules abrasives sont transportées par de l'air puis sont introduites dans le jet d'eau avec un débit d'abrasif D_a de l'ordre de quelques centaines de grammes par minute. Les particules abrasives sont accélérées dans un canon de focalisation et projetées sur la pièce (cf. Fig.1). Le JEA travaille à profondeur constante h alors que l'usinage conventionnel usine à cote constante. La Fig. 2 compare de façon schématique deux situations d'usinage : l'une obtenue avec le JEA et l'autre avec un outil coupant sur une pièce de forme avec un tracé d'outil rectiligne. En effet, les pièces en matériaux composites sont généralement des pièces de forme ce qui souligne l'intérêt du JEA comme technique d'enlèvement de matière. De plus, elles possèdent des contraintes internes liées aux conditions de mise en œuvre. Ces contraintes sont généralement équilibrées grâce au choix d'une séquence d'empilement symétrique. Mais l'usinage supprime localement cette symétrie ce qui

entraîne une déformation de la pièce. Dans le cas d'un usinage conventionnel, il est donc nécessaire de maintenir fermement la pièce pour que ces déformations ne modifient pas la géométrie de l'usinage. En JEA, le profil de la pièce peut évoluer au cours de l'usinage sans que la profondeur usinée n'en soit affectée [3].

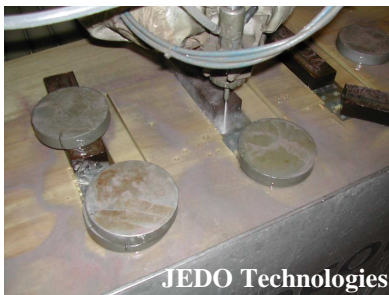


Fig. 1. Photo d'usinage non débouchant par balayage sur matériaux composites.

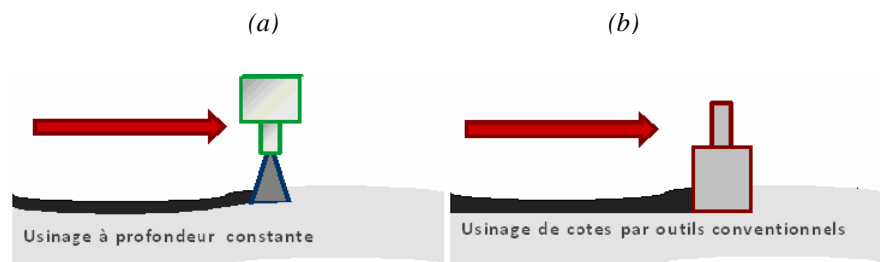


Fig. 2. Comparaison entre l'usinage JEA à profondeur constante (a) et l'usinage conventionnel à cote constante (b).

Une étude du fraisage de l'aluminium par jet d'eau abrasif a été réalisée [4]. Un protocole pour la maîtrise de la profondeur d'enlèvement de matière a été proposé. Il s'agit de se baser sur les résultats et les observations de cette étude pour adapter le protocole expérimental de fraisage aux matériaux composites.

2. Objectifs de l'étude

On veut réaliser un plan complet sur l'usinage d'un aluminium 2024T3 et d'un carbone / époxy HexPLY M21/35%/268/T700GC (de chez Hexcel Composites) de 20 plis avec une séquence d'empilement quasi-isostatique polymérisé en autoclave. Afin de réaliser le plan complet, les méthodologies classiques d'étude [5] sont adaptées selon trois volets. Le premier volet porte sur le remplacement du paramètre débit d'abrasif D_a par le paramètre ratio de débit d'abrasif optimal Ω ($D_a/D_{a,opt}$) pour limiter l'influence des couplages entre pression P , débit d'abrasif D_a et diamètre de buse d_b . Le second volet est associé au choix de mener des études à profondeur constante en ajustant la vitesse d'avance f (au lieu de travailler à vitesse d'avance constante). Le troisième volet concerne l'introduction du rendement global de buse r_g afin de rendre compte du débit d'eau réel [6]. Les objectifs spécifiques poursuivis dans ce papier sont d'établir plusieurs modèles concernant d'une part, le débit d'abrasif optimal $D_{a,opt}$ en fonction de la pression P , du diamètre de buse d_b et de la profondeur usinée h et d'autre part, la vitesse d'avance f en fonction de la pression P , du diamètre de buse d_b , du ratio de débit d'abrasif optimum Ω ($D_a/D_{a,opt}$) et de la profondeur h .

3. Différences entre les composites et l'aluminium

Entre les composites et l'aluminium, il existe deux différences majeures liées à l'effet du JEA. Elles correspondent aux écarts entre ces matériaux concernant l'usinabilité et les variabilités. En premier lieu, l'usinabilité des matériaux composites est environ 11.5 fois plus grande que celle de l'aluminium pour le JEA [7]. Pour un même jeu de paramètres JEA, la vitesse d'avance f nécessaire doit être 11.5 fois plus grande pour obtenir la même profondeur d'enlèvement de matière h . Or l'usinage JEA des composites a un grand intérêt pour le pelage pli par pli d'une structure, c'est à dire pour des profondeurs variant entre 0.2 mm et 0.4 mm. On constate que les vitesses d'avance f des machines JEA courantes ne permettent pas de réaliser un plan complet pour une profondeur constante h de 0.2 mm. C'est pourquoi les essais de cette étude sont réalisés avec des profondeurs h de 0.4 mm et 0.6 mm.

Ensuite, les matériaux composites présentent une variabilité géométrique et mécanique plus importante que l'aluminium. La variabilité de l'épaisseur d'une pièce composite ne permet plus d'effectuer les mesures de dimensions au pied à coulisse comme pour l'aluminium. Une machine de

mesure par analyse d'images est utilisée en tenant compte des problèmes consécutifs aux relaxations de contraintes et à la définition de prises de référence (cf. Fig. 3). La Fig. 3 montre un exemple du choix des points de référence et de mesure attaché à une poche ou zone usinée. Des exemples de poches usinées sont montrés en Fig. 4.

En effet lors de la relaxation des contraintes internes par perte de symétrie miroir, il s'ensuit une déformation de la géométrie de la pièce et donc de la surface de référence. Cette surface de référence doit être retrouvée après usinage alors que, de fait, elle a disparu. Des points de référence sont donc considérés autour des zones usinées, et les mesures sont interpolées pour identifier la surface de référence au niveau de la poche. Evidemment, cette référence interpolée ne peut pas être absolue et des écarts difficilement quantifiables sont introduits dans le calcul des profondeurs h . Le passage par une machine de mesure optique impose de réaliser les usinages en utilisant des masques métalliques afin de préserver les zones servant de référence entre toutes les poches (cf. Fig. 3).

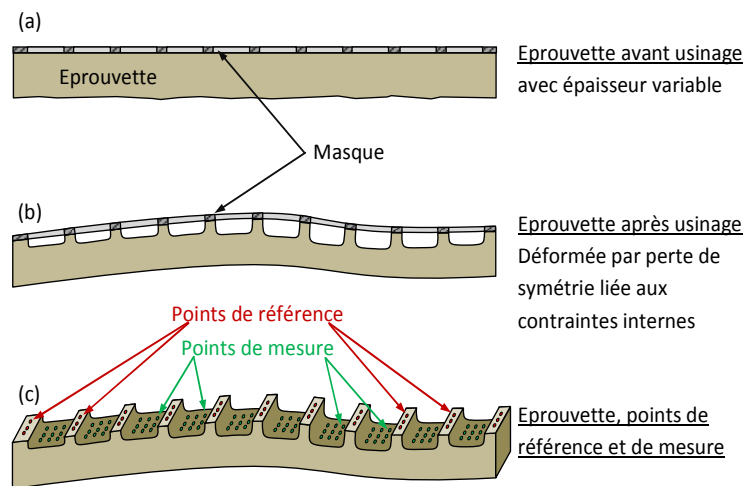


Fig. 3. Représentations schématiques de l'éprouvette et son masque avant usinage (a) et après usinage (b) avec la position des points de référence et de mesure (c).

Dans le cas de l'aluminium, le couplage entre la pression P , le diamètre de buse d_b et le débit d'abrasif D_a concerne le débit d'abrasif optimal $D_{a_{opt}}$ et le risque de bouchage de la tête de coupe par l'abrasif. Dans le cas des composites, ce couplage concerne de plus le risque de délaminage (cf. Fig. 4).

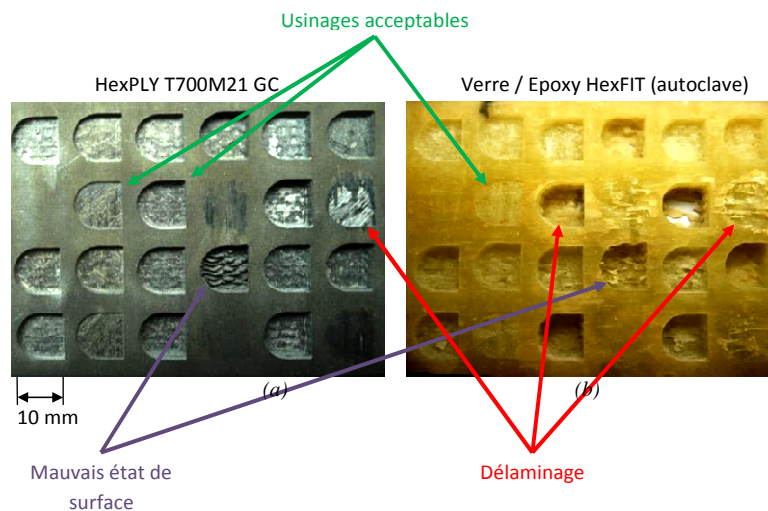


Fig. 4. : Photos d'usinages sur M21T700 avec : (a) et sur HexFIT (b) avec exemples de poches à grande rugosité, de poches avec délaminage et d'usinages acceptables.

Le délaminage des matériaux composites et le bouchage de la tête de coupe limitent les domaines expérimentaux de sorte que les plans complets sont confinés dans de plus petits espaces pour les composites comparés à l'aluminium. Dans le cas des composites, le choix du remplacement du paramètre débit d'abrasif D_a par le paramètre débit d'abrasif optimal Da_{opt} , est d'autant plus nécessaire afin d'autoriser des plans complets sur de larges domaines [3].

4. Détermination du débit d'abrasif optimal Da_{opt} et de la vitesse d'avance f

En usinage comme en découpe, le paramètre débit d'abrasif D_a passe par un optimum (appelé débit d'abrasif optimal Da_{opt} qui maximise la profondeur usinée h . Cet optimum est dépendant de la configuration du jet (pression et buse), mais aussi du canon, de l'application et des abrasifs utilisés. La détermination du débit d'abrasif optimal Da_{opt} s'effectue comme suit : pour chaque réglage de pression P , de buse (rendement r_g et diamètre d_b) et de profondeur h , plusieurs débits d'abrasif D_a (huit pour l'aluminium et dix pour les composites), supposés contenir le débit d'abrasif optimal, sont employés. Une première vitesse d'avance f est aussi réglée en supposant qu'elle conduise à une profondeur maximale h_{max} égale à la profondeur voulue h_k (cf. Fig. 5 pour un exemple sur l'aluminium).

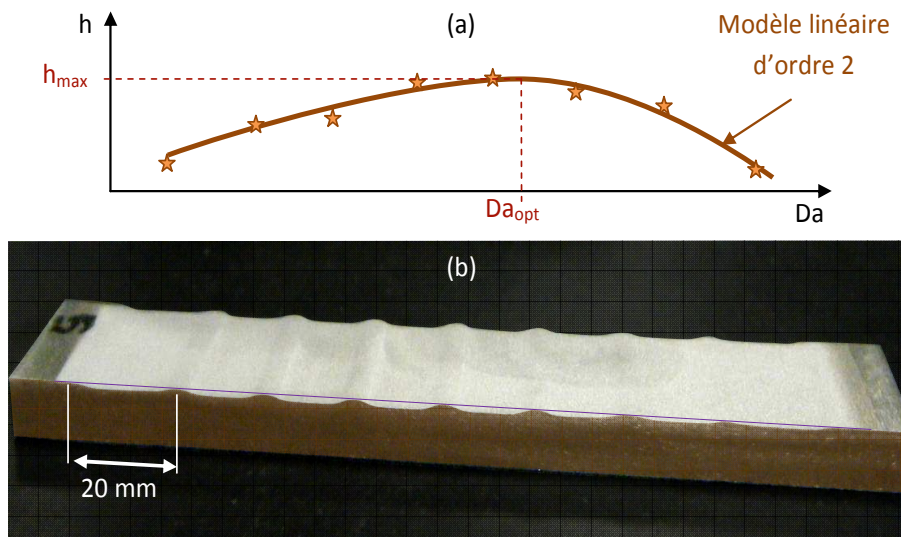


Fig. 5. Représentation schématique de la relation entre le débit d'abrasif Da et profondeur usinée h avec (a) avec une photo d'une éprouvette d'aluminium (b).

Ainsi, chaque éprouvette permet d'associer une profondeur maximale h_{max} et un débit d'abrasif optimal Da_{opt} à chaque réglage de pression P , de buse et de vitesse d'avance f . Lorsque que la profondeur maximale obtenue h_{max} est trop éloignée de la profondeur souhaitée h_k , une nouvelle éprouvette est réalisée avec une vitesse d'avance recalée (cf. Fig. 6).

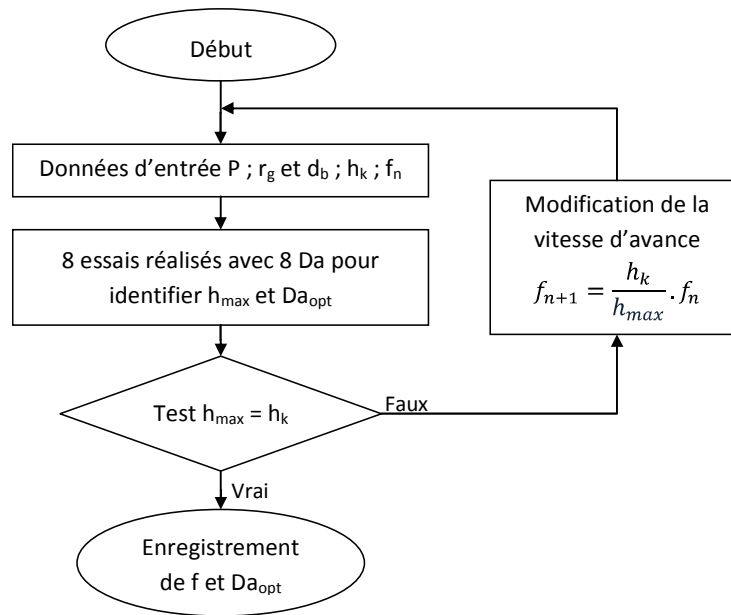


Fig. 6. Algorithme pour la détermination expérimentale de la vitesse d'avance f et du débit d'abrasif optimal Da_{opt} pour un jeu de paramètres JEA avec : P la pression, r_g et d_b le rendement global et le diamètre de buse, h_k la profondeur d'usinage, f_n la vitesse d'avance testée et h_{max} la profondeur maximale mesurée.

5. Etude sur l'aluminium

Pour l'étude sur aluminium, 522 essais ont été entrepris pour identifier le débit d'abrasif optimal et la profondeur maximale d'usinage pour les paramètres JEA suivants :

- quatre pressions P allant de 500 à 1250 bar (on note que pour des pressions plus faibles, la vitesse d'avance f est trop lente et pour des pressions plus élevées, les vitesses sont trop élevées pour la machine utilisée chez JEDO Technologies, cf. Fig. 1) ;
- quatre diamètres de buse d_b allant de 0.127 à 0.325 mm (ces diamètres sont représentatifs des buses utilisables avec la pompe à entraînement direct utilisée avec une pression de 3850 bar et un débit volumique de 3.1 l/min) ;
- huit débits d'abrasifs D_a adaptés aux paramètres hydrauliques (de pression et de buse) ;
- deux profondeurs h allant de 0.2 et 0.39 mm.

Ces valeurs sont ensuite utilisées pour identifier un modèle linéaire en logarithme d'usinage par JEA (cf. Fig. 7). On observe une bonne corrélation (coefficient de corrélation de 0.992) entre les valeurs mesurées et celles données par le modèle de l'équation (eq. 1) :

$$f = 1,482 \cdot 10^{-3} \cdot P^{2,147} \cdot (r_g \cdot d_b^2)^{0,879} \cdot \Omega^{0,391} \cdot h^{-0,971} \quad (\text{eq. 1})$$

avec : f la vitesse d'avance, P la pression d'eau, r_g le rendement global des buses, d_b le diamètre de buse, Ω le ratio de débit d'abrasif optimal (D_a/Da_{opt}) et h profondeur usinée.

Pour des faibles diamètres de buse, un écart relatif maximal inférieur à 10 % entre les mesures et le modèle est enregistré. Cet écart atteint 30 % lorsque le diamètre de buse est de 0.325 mm. L'origine de la présence de cassures dans les courbes liées au modèle vient de l'introduction du rendement de buse r_g . On note d'ailleurs que ces formes en zigzag se retrouvent dans les résultats expérimentaux (cf. Fig. 7). L'intérêt de la méthodologie proposée est qu'elle permet d'étudier les phénomènes sur un large domaine tout en conservant un même mode d'érosion. Il est alors plus aisé de repérer les points aberrants. On peut observer un décalage important concernant la buse de

diamètre 0.325 mm pour la profondeur de 0.39 mm. Ce décalage est lié à l'effet d'une maintenance de la machine qui est un outil de production chez JEDO Technologies (cf. Fig. 1). Des différences de pression de l'ordre de 60 bars entre la consigne et la pression réelle ont été observées. Cet écart, acceptable pour de la découpe mais pas pour de l'usinage, a suscité une étude interne chez JEDO Technologies de fiabilisation de la pression.

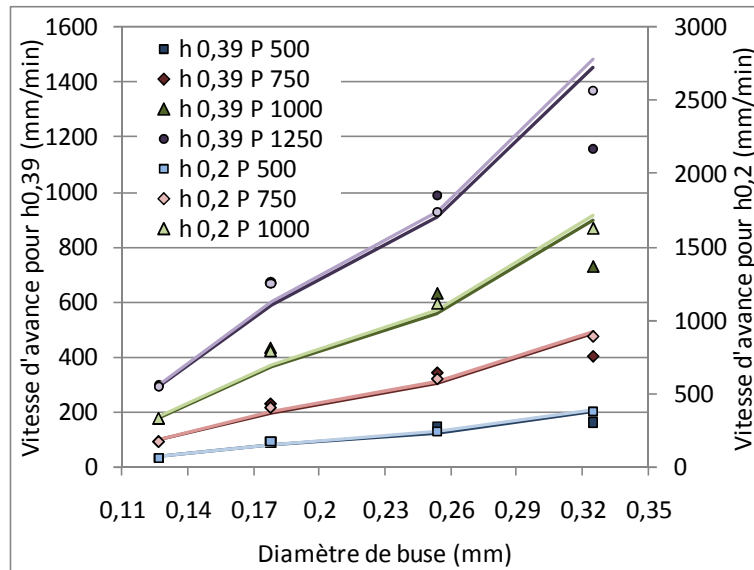


Fig. 7. Vitesse d'avance f sur aluminium 2024 en fonction du diamètre de buse d_b , pour différentes pressions et deux profondeurs h (0,2 et 0,39 mm). Les points sont les résultats expérimentaux et les lignes les résultats du modèle.

6. Etude sur les composites

Dans le cas des composites, il est nécessaire de considérer 570 essais réalisés pour identifier le débit d'abrasif optimal Da_{opt} et la profondeur maximale d'usinage h_{max} et ne pas pénaliser la précision du modèle d'usinage par JEA (cf. Fig. 8). Les paramètres JEA sont les suivants :

- quatre pressions P allant de 500 à 1250 bar ;
- quatre diamètres de buse d_b allant de 0.127 à 0.254 mm (la buse de diamètre 0,325 mm ne permet pas de réaliser le plan complet du fait du dépassement des vitesses maximales de la machine) ;
- dix débits d'abrasif D_a adaptés aux paramètres hydrauliques (contre huit pour l'aluminium du fait des variabilités matériau et du protocole de mesure, cf. Fig. 3) ;
- deux profondeurs h allant de 0.4 et 0.6 mm (ces profondeurs correspondent à quelques plis de matériau composite soit de 2 à 3 plis, sachant que la profondeur de 0,2 mm ne permet pas de réaliser le plan complet du fait du dépassement des vitesses maximales de la machine).

Pour le composite, on constate que les résultats expérimentaux sont plus stables d'une profondeur à l'autre que dans les résultats présentés pour l'aluminium (cf. Fig. 7). Cette amélioration est mise au crédit du système de fiabilisation de la pression assurant ainsi la reproductibilité des résultats. On remarque aussi que le modèle (eq. 2) surestime les vitesses d'avance requises avec la plus grosse buse :

$$f = 2,333 \cdot 10^{-3} \cdot P^{2,162} \cdot (r_g \cdot d_b^2)^{0,991} \cdot \Omega^{0,396} \cdot h^{-0,951} \quad (\text{eq. 2})$$

avec : f la vitesse d'avance, P la pression d'eau, r_g le rendement global des buses, d_b le diamètre de buse, Ω le ratio de débit d'abrasif optimal et h profondeur usinée.

Cet écart est principalement visible pour les pressions élevées. Des résultats similaires ont déjà été identifiés lors de l'usinage de l'aluminium. Il semble donc que le modèle linéaire en logarithme surestime la vitesse d'avance pour les grandes pressions et les grands diamètres de buse par rapport aux résultats expérimentaux. Ce modèle (eq. 2) a un coefficient de corrélation de 0.993 avec un écart relatif maximal de 19 %. Ces résultats sont meilleurs que ceux obtenus sur aluminium mais ils représentent une plage plus étroite de diamètres de buse.

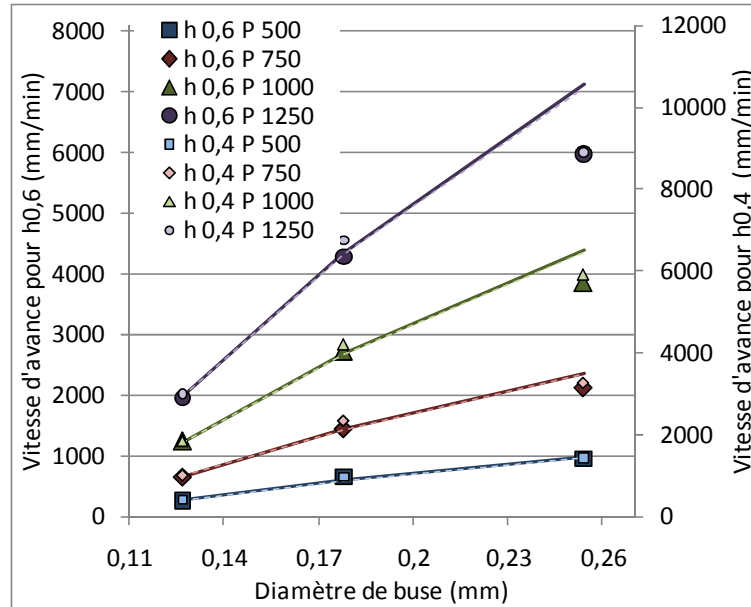


Fig. 8. Vitesse d'avance f sur le composite HexPLY M21 T700 en fonction du diamètre de buse d_b pour différentes pressions P et deux profondeurs h (0,4 et 0,6 mm). Les points sont les résultats expérimentaux et les lignes les résultats du modèle.

7. Comparaison des usinages par JEA entre composites et aluminium

Les modèles d'usinage identifiés sur aluminium (eq. 1) et sur composite (eq.2) ont des constantes très proches. Les différences principales concernent le coefficient de proportionnalité et la puissance correspondant à la buse. Concernant la puissance de la buse, on retrouve la lacune de représentativité du modèle pour la plus grande buse du domaine expérimental. Pour l'aluminium, la puissance est maintenue basse car on utilise une quatrième buse (de diamètre 0.325 mm). Pour les composites, cette buse n'a pas pu être utilisée du fait de la limitation des vitesses maximales de la machine. Donc la puissance de la buse est surestimée.

Concernant la constante de proportionnalité des modèles, elle rend compte de la différence d'usinabilité des deux matériaux étudiés. Il est alors possible de définir un modèle commun aux deux matériaux en ne considérant le matériau que dans une constante de proportionnalité (donc sans dimension) U qui peut ainsi être appelée usinabilité. Après identification, l'expression (eq. 3) suivante est obtenue :

$$f = U \cdot P^{2,136} \cdot (r_g \cdot d_b^2)^{0,905} \cdot \Omega^{0,415} \cdot h^{-1,027} \quad (\text{eq. 3})$$

avec : $U = 1,616 \cdot 10^{-3}$ pour l'aluminium et $U = 1,871 \cdot 10^{-3}$ pour le composite.

Ce modèle a un coefficient de corrélation de 0.997 et un écart relatif maximal de 29 %. Le coefficient de corrélation de ce modèle unique est plus élevé que ceux des modèles identifiés sur un seul matériau (0.992 pour l'aluminium et 0.993 pour le composite). Ceci s'explique par la variabilité des résultats. La méthodologie mise en œuvre permet de réduire l'influence de la variabilité du procédé d'usinage sur les résultats expérimentaux. Mais il reste néanmoins une

certaine variabilité (entre autre relevée sur l'aluminium). Le regroupement des résultats obtenus sur les deux matériaux permet de réduire l'influence de ces variabilités sur la forme du modèle et donc sur son coefficient de corrélation.

Les graphiques sur la Fig. 9 et la Fig. 10 présentent une confrontation entre les résultats du modèle commun (eq. 3) et les résultats expérimentaux obtenus sur composite (Fig. 9) et sur aluminium (Fig. 10).

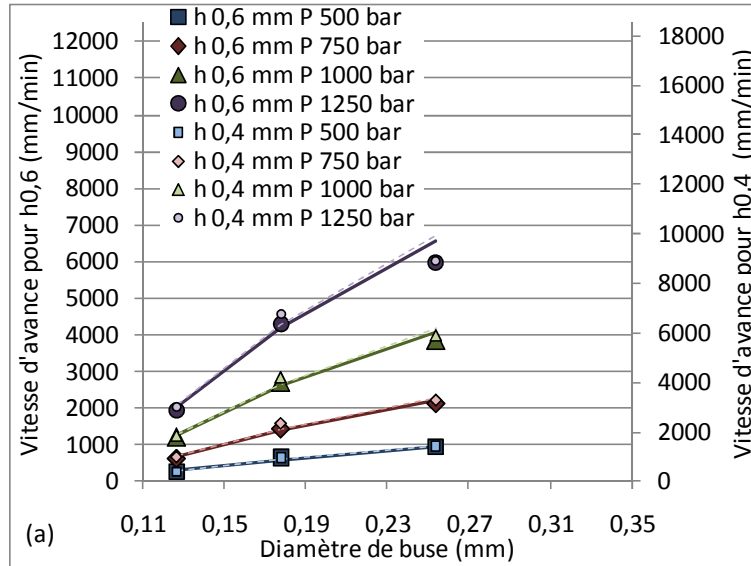


Fig. 9. Vitesse d'avance f en fonction du diamètre de buse d_b , de la profondeur h et de la pression P sur composite. Les points et les courbes correspondent respectivement aux résultats expérimentaux et aux résultats du modèle commun (eq. 3).

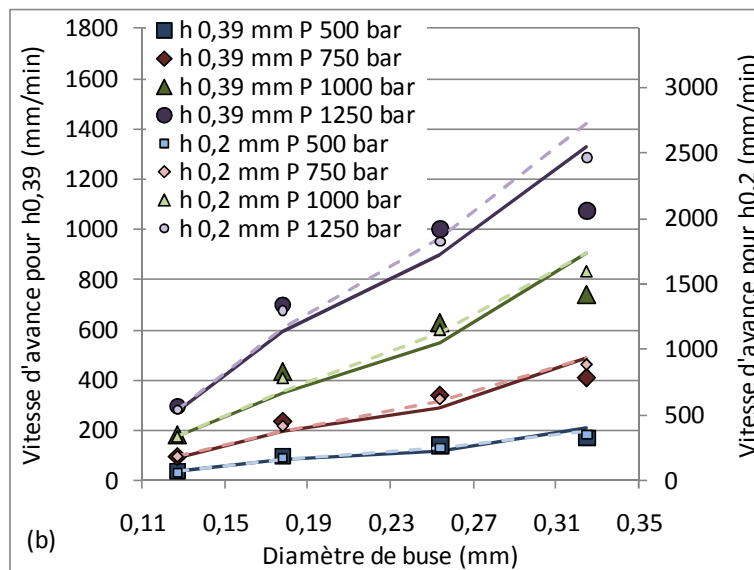


Fig. 10. Vitesse d'avance f en fonction du diamètre de buse d_b , de la profondeur h et de la pression P sur aluminium. Les points sont les résultats expérimentaux et les lignes les résultats du modèle commun (eq. 3).

On constate que l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sur aluminium et composite sont bien représentés par le modèle d'usinage commun (eq.3). Le principe d'usinabilité est donc validé sur ces deux matériaux pourtant très différents. La représentativité de ce modèle commun renforce l'intérêt de la méthodologie mise en œuvre. En effet, les méthodes classiques d'étude de l'usinage par JEA conduiraient à des profondeurs h dans un rapport proche de 800 (par exemple de 0.1 mm à 80 mm) avec un seul niveau de vitesse d'avance f .

8. Applications

En se basant sur les résultats obtenus dans cette étude, plusieurs applications sont mises en œuvre. Ce paragraphe présente certains usinages proches d'applications industrielles. D'abord, il est possible de réaliser des usinages précis de réparation en escaliers (type step-lap) par un moyen de production industriel (cf. Fig. 11).



Fig. 11. Photo d'un usinage de réparation en escalier sur 8 plis de profondeur réalisé par JEA dans un composite en carbone époxy.

Ensuite des pièces usinées avec profondeur variable (réparation de type scarf) mettent en évidence le contrôle de la profondeur usinée (cf. Fig. 12).

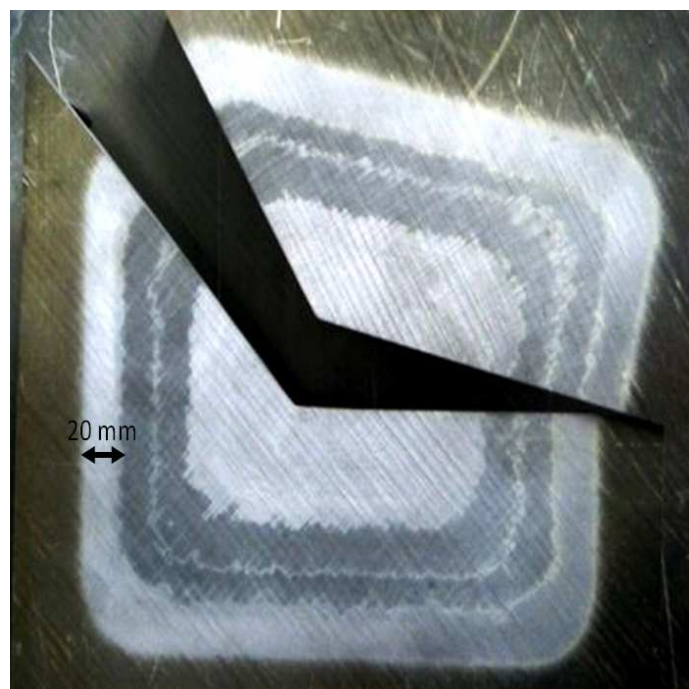


Fig.12. Photo d'un usinage de réparation en pente de 5 plis de profondeur réalisé par JEA dans un composite en carbone époxy.

9. Conclusion

En regroupant les résultats expérimentaux obtenus sur aluminium et sur composite, nous avons défini un modèle d'enlèvement de matière généralisé (eq. 3) dans lequel le matériau est caractérisé par un paramètre d'usinabilité U . La confrontation entre les résultats du modèle commun et les données expérimentales démontre la pertinence de la méthodologie mise en place ($R^2=0.997$). Par contre, les modèles linéaires en logarithme semblent surestimer les vitesses d'avance f requises pour les grands diamètres de buse d_b , entraînant localement un écart relatif pouvant atteindre 29 %.

Ces résultats forment une base de données fiable et performante pour explorer toutes les possibilités et limites de l'usinage non débouchant par JEA. En particulier, il serait intéressant d'intégrer l'influence de différents paramètres technologiques comme la géométrie du canon de focalisation, la hauteur de coupe ... Le domaine expérimental doit également être élargi à des plages plus larges de pression P , de type de matériaux et de profondeurs h .

A ce jour, les résultats sont d'ores et déjà suffisamment précis pour permettre la réalisation d'usinages de haute technicité et de grande précision.

Remerciements

A partir de 2006 et avec le cofinancement notamment du Conseil Régional Midi Pyrénées et de l'Etat par l'intermédiaire de deux programmes EPICEA (Emergence de Projets Innovants Composite portés par des Entreprises Aéronautiques) : UJEC (Usinage Jet d'Eau des Composites) et PROMAJEC (PROTOTYPE de MACHINE JET d'eau abrasif pour l'usinage de pièces Composites structurales), un partenariat très actif Industrie/Recherche s'est développé entre la PME JEDO Technologies et l'équipe de recherche MSC-MaPP de l'ICA, complété par la suite par l'arrivée d'experts travaillant au sein de la SaRL Composites Expertise & Solutions.

Références

- [1] F. CENAC, F. COLLOMBET, M. DELERIS, R. ZITOUNE, « Abrasive water jet machining of composites ». *Machining Composite Materials*, book auth. J. P. Davim, Iste Eds., pp. 167-180, 2009.
- [2] M. HASHISH, « AWJ trimming of 787 composite stringers ». *Conference SAMPE 2010*, Seattle, WA (USA), May 17-20, 16 pages 2010.
- [3] L. CROUZEIX, F. CENAC, F. COLLOMBET, R. ZITOUNE, Y.-H. GRUNEVOLD, M. DELERIS, « Comportement d'une réparation en escalier obtenue par Jet d'Eau Abrasif ». *Actes des 17^{ème} Journées Nationales sur les Composites*, Poitiers, France, juin 2011.
- [4] F. CENAC, F. COLLOMBET, R. ZITOUNE, M. DELERIS, « Innovative methodology for studying Abrasive Water-Jet milling ». *Journal of Machine Tools and Manufacture*, accepted for publication, 10 pages in revision, 2010.
- [5] R. KOVACEVIC, « Monitoring the depth of abrasive waterjet penetration ». *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, pp. 725-736, 1992.
- [6] M. ANNONI et al., « Orifice coefficients evaluation for water jet applications ». *16th IMEKA TC4 Symposium*, Florence, Italy, 6 pages, Sept. 2008.
- [7] F. CENAC, « Etude de l'usinage non débouchant par jet d'eau abrasif de composites ». *Thèse de l'Université Toulouse III*, 25 Mars 2011.