

Usinabilité d'un composite à matrice céramique oxyde-oxyde par jet d'eau abrasif

Abrasive waterjet machinability of an oxide-oxide ceramic matrix composite

Manon Latour¹, Laurent Crouzeix¹, Claire Morel¹, Gilles Dusserre¹, Rédouane Zitoune¹, Thierry Cutard¹ et Jean-Charles Malenfant²

1 : Institut Clément Ader
UMR-CNRS 5312, Université de Toulouse, IMT Mines Albi, INSA, UPS, ISAE-SUPAERO, Campus Jarlard, F-81013 Albi, France
manon.latour@mines-albi.fr

2 : Safran Ceramics, Safran Tech, 105 Avenue Marcel Dassault, 33700 Mérignac, France

Résumé

L'usinage des composites à matrice céramique (CMC) représente un challenge pour la fabrication de pièces structurales aéronautiques. Le jet d'eau abrasif (JEA) est une solution d'usinage peu étudiée mais très prometteuse, puisqu'elle limite fortement la dégradation structurale du matériau usiné. Ces travaux ont pour but de démontrer la faisabilité de ce type d'usinage sur un CMC oxyde-oxyde puis de développer un modèle empirique dans le but de contrôler et prédire la profondeur usinée. Tout d'abord, une étude de certains paramètres de la machine de JEA a été réalisée, permettant de sélectionner les paramètres sur lesquels l'étude se focalisera. Un plan d'expérience a été construit pour étudier l'influence de la pression du jet d'eau, la vitesse d'avance et le débit d'abrasif sur la profondeur usinée. Différentes étapes de caractérisations sont mises en œuvre notamment par microscopie confocale et électronique à balayage, suivies par du traitement d'image. Suite au plan d'expérience, la capacité d'usiner un CMC oxyde-oxyde par JEA a été démontrée et un modèle permettant de prédire la profondeur usinée avec une erreur inférieure à 10 % a été développé.

Abstract

Machining ceramic matrix composites (CMC) represents a challenge in manufacturing structural aerospace components. Abrasive water jet (AWJ) machining is a relatively underexplored but up-and-coming solution, as it induces less defects compared to the conventional machining. This work aims to demonstrate the feasibility of this machining on an oxide-oxide CMC (OCMC) and develop an empirical model to control and predict the machined depth. First, a study of some AWJ machine parameters was conducted, which allowed for the selection of the parameters to focus on. A design of experiments was constructed to investigate the influence of water jet pressure, feed rate, and abrasive flow rate on the machined depth. Various characterization steps were implemented to achieve this, including confocal and scanning electron microscopy, followed by image processing. Following the design of experiments, the ability to machine an OCMC by AWJ has been demonstrated and a model has been developed to predict the machined depth with an error of less than 10 %.

Mots Clés : composite à matrice céramique oxyde-oxyde, jet d'eau abrasif, usinage, profondeur, caractérisation.

Keywords: ceramic matrix composite oxide-oxide, abrasive water jet, machining, depth, characterization.

1. Introduction

L'industrie des moteurs aéronautiques montre un intérêt croissant pour l'utilisation des composites à matrice céramique oxyde-oxyde (CMC Ox-Ox). En effet, leur faible densité, leur haute température de fusion et leur faible coefficient de dilatation en font d'excellents candidats pour leur utilisation dans certaines parties des moteurs d'avion civils, comme les arrières corps, les tuyères ainsi que les plugs. Ils permettraient en effet de réduire l'impact environnemental des avions équipés de moteurs à combustion interne, en augmentant les températures de fonctionnement et en réduisant le poids des structures [1]. Pour favoriser le déploiement en service de pièces fabriquées à partir de ce type de matériau, il est particulièrement utile de maîtriser les techniques d'usinage non débouchant. Ces compétences s'avèrent essentielles dans divers contextes : la création de pièces à géométrie complexe, le retrait de matière endommagée, la préparation de surface dans le cadre d'opérations de réparation, ou encore lors d'assemblages.

Les méthodes d'usinage dites conventionnelles (par outil de coupe) peuvent être problématiques. Les outils de coupe provoquent généralement de l'échauffement thermique et des efforts de coupe qui peuvent altérer les propriétés mécaniques du matériau, en générant des endommagements tels que des

délaminages, de l'arrachement de fibres, des ruptures de fibre ou de la fissuration matricielle, ou de la pollution par des lubrifiants de coupe [2]. D'autres procédés sont ainsi étudiés tels que l'usinage par ultrasons et par jet d'eau abrasif (JEA). L'usinage par jet d'eau abrasif se distingue puisqu'il réduit drastiquement les efforts de coupe et qu'il est capable d'usiner une très grande diversité de matériaux [3]. De plus, ce procédé est de plus en plus considéré pour sa capacité à réaliser de l'usinage non débouchant dit « pli à pli », très adapté aux opérations de préparation à une réparation. Cette méthode est déjà appliquée sur les composites à matrice organique (CMO) afin de générer un état de surface adapté à un assemblage par collage, et donc le rendre plus durable [4]. À la connaissance des auteurs, aucune étude n'a été publiée sur l'usinage non débouchant par JEA sur CMC Ox-Ox.

Les objectifs de ces travaux sont dans un premier temps d'évaluer la faisabilité de l'usinage par JEA sur un matériau CMC Ox-Ox, puis, de développer un modèle empirique capable de prédire la profondeur usinée à partir des paramètres d'usinage. Pour répondre à ces problématiques, tout d'abord une présentation du matériau sera faite puis le principe de l'usinage non débouchant par jet d'eau abrasif ainsi que des paramètres étudiés et des différentes méthodes de caractérisation seront données. Ensuite, les résultats de cette étude seront interprétés et les perspectives pour la suite seront abordées.

2. Matériau de l'étude

Le matériau dédié à cette étude est produit par *Safran Ceramics* sous le nom de *Cerasep A100 (DF11, AS)*. Il est constitué de mèches de fibres d'alumine *Nextel™ 610 DF11*, fabriquées par *3M™*, imprégnées par une matrice à base d'alumine et de silice. Le procédé de mise en œuvre débute par une phase de préimprégnation, qui consiste à tremper les préformes fibreuses dans une suspension aqueuse contenant les poudres céramiques, avant de les draper sur un support, puis les placer en autoclave pour une étape à froid (inférieure à 200°C) afin d'obtenir les caractéristiques de taux volumique de fibre et porosité souhaités et puis complété par une étape de frittage avec des températures supérieures à 1000°C. Pour cette étude, le CMC Ox-Ox est un empilement de tissus 2D préimprégnés en satin de 5 (Fig. 1a), avec une stratification, quasi-isotrope et symétrique ([0°/45°/90°/-45°]s) [1]. Après fabrication, l'épaisseur de la plaque est de l'ordre de 1,6 mm (Fig. 1b).

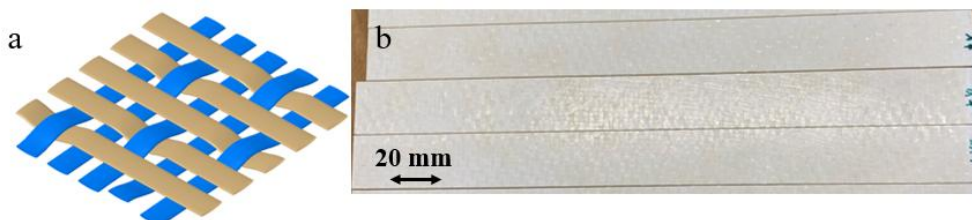


Figure 1 : a) Plaques de CMC Ox-Ox (220×20 mm², 8 plis) et b) illustration de l'architecture des plis réalisés en satin de 5.

3. Méthodes

3.1 Usinage par jet d'eau abrasif

Tous les usinages ont été réalisés sur une machine de découpe par JEA de type *Flow International Mach 4c* (Flow International Corporation). Elle est équipée d'une tête *Dynamic Waterjet* à cinq axes et d'une pompe *Hyplex*. Le jet d'eau abrasif est notamment utilisé pour de la découpe sur une très large gamme de matériaux (typiquement tout sauf le verre trempé) [6], [5], pour des épaisseurs très variées, tout en limitant au maximum l'utilisation d'agents polluants. Le principe de l'usinage non débouchant reste le même que celui de la découpe : un jet d'eau sous haute pression est mélangé à des particules abrasives ajoutées à un débit contrôlé, ce mélange est ensuite projeté sur le matériau à usiner [7]. Les différences se retrouvent dans les réglages des paramètres de la machine. Par exemple, si une distance de tir habituellement utilisée en découpe est de l'ordre de 2 à 3 mm elle est augmentée pour de l'usinage non débouchant afin de réduire l'énergie d'impact du jet, ici fixée à 100 mm. L'objectif de l'usinage non débouchant est d'enlever une ou plusieurs couches de matériau pour atteindre une profondeur cible, modifier l'état de la surface et le préparer pour un assemblage ultérieur.

Lors d'une passe d'usinage, la tête de la machine effectue un balayage suivant le motif illustré sur la Fig. 2a, avec un écart entre deux lignes adjacentes, appelé pas de balayage. L'usinage va dépendre d'un grand nombre de paramètres fonction de la machine utilisée, dont par exemple : diamètre de la buse (0.3 mm pour notre machine), diamètre du canon de focalisation (1.013 mm dans notre étude), longueur du canon (70 mm) ou type d'abrasif utilisé (*Garnet* 120 mesh). Mais le résultat est aussi très dépendant de paramètres choisis par l'opérateur, qui sont au nombre de 5 : pression (P), vitesse de déplacement (V), pas de balayage, distance de tir et débit d'abrasif (Da).

Les zones usinées sont appelées « poches » et ont une surface de 20×20 mm². Elles sont séparées par des zones non usinées de la même surface, comme illustré sur la Fig. 2b, qui serviront de plan de référence pour la détermination des profondeurs usinées.

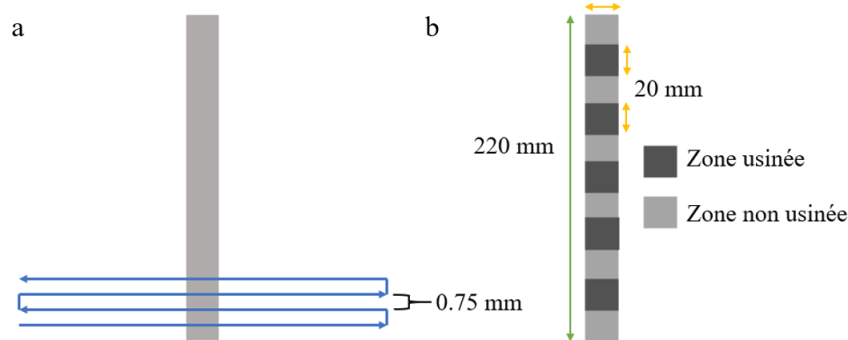


Figure 2 : a : Schéma de la trajectoire du jet d'eau abrasif avec représentation du pas de balayage (ici de 0,75 mm), et b : Schéma de la configuration des usinages sur une éprouvette de 20 mm de largeur.

Pour réaliser cette étude, un plan d'expérience de type Taguchi a été construit. Trois paramètres machines ont été sélectionnés comme variables d'entrée : la pression du jet (P), la vitesse de déplacement de la traverse (V) et enfin, le débit d'abrasif (Da).

En l'absence de littérature ouverte sur l'usinage par JEA de ce type de matériaux CMC et sur laquelle s'appuyer, une étude préliminaire a permis de choisir les plages de valeur pour ces trois paramètres, compatibles avec les limites machine, et qui permettent d'usiner environ 1 pli : $200 \mu\text{m} \pm 100 \mu\text{m}$. La distance de tir, réputée avoir peu d'influence sur la profondeur usinée, est fixée à une valeur de 100 mm, valeur couramment employée lors de l'usinage des composites à matrice organique (CMO) [12]. Le pas de balayage est fixé à une valeur inférieure au diamètre du canon (0,75 mm pour un canon de ~ 1 mm) en se basant sur les valeurs, données dans la littérature ouverte, qui permettent d'assurer un recouvrement entre deux traits d'usinage [11]. Il est à noter que les valeurs de pression (entre 33 et 44 MPa) utilisées sont des valeurs très basses pour la machine, ce qui, ajouté au fait que la régulation de pression de la pompe n'est pas asservie (fonctionnement en boucle ouverte associé à une calibration préalable), entraîne quelques variations entre la consigne et la valeur obtenue.

Pour chacun des trois paramètres sélectionnés, trois niveaux ont été définis : un niveau haut (H), un niveau médian (M) et enfin un niveau bas (B).

La méthode Taguchi utilisée permet de réduire le nombre d'expériences, de 27, en considérant toutes les combinaisons possibles des 3 niveaux pour les 3 paramètres, à 9 en utilisant des matrices orthogonales, ici la matrice L9 (3^3) [8]. La matrice d'essais des usinages est présentée dans le Tab. 1.

Elle a été répétée trois fois, de manière à étudier la répétabilité des usinages sur le matériau CMC Ox-Ox. La mise en place du plan d'expérience a pour objectif de développer un modèle de prédiction.

Tableau 1 : Matrice d'essais du plan d'expérience sur l'usinage par jet d'eau abrasif.

Notation	Pression (MPa)			Vitesse (m/min)	Débit d'abrasif (g/min)
	Valeur consigne	Valeur minimale obtenue	Valeur maximale obtenue		
P _H	45	43	46	12 (V _B)	125 (Da _B)
	45	43	46	16 (V _M)	187 (Da _M)
	45	43	46	20 (V _H)	224 (Da _H)
P _M	40	39	41	16 (V _M)	125 (Da _B)
	40	39	41	20 (V _H)	187 (Da _M)
	40	39	41	12 (V _B)	224 (Da _H)
P _B	35	33	34	20 (V _H)	125 (Da _B)
	35	33	34	12 (V _B)	187 (Da _M)
	35	33	34	16 (V _M)	224 (Da _H)

3.2 Méthodes de caractérisation

Une fois les poches usinées, leur géométrie est caractérisée afin de déterminer la profondeur moyenne des poches, et à terme les états de surface. Dans un premier temps, l'acquisition se fait sur un microscope confocal *LEXT LASER d'Olympus*, avec un grossissement $\times 5$, il fournit une image optique et aussi les valeurs d'altitude des surfaces. Les mesures sont faites sur des rectangles de $33 \times 5 \text{ mm}^2$. Cela permet d'avoir de part et d'autre de la surface usinée des zones non usinées, comme altitude de référence, qui permettront d'accéder à la profondeur usinée. Une étape de post-traitement est ensuite réalisée sur *Gwyddion* puis sur *Matlab*. Un plan moyen est calculé sur l'ensemble de la surface non usinée de part et d'autre de la poche. Ce plan est dégauchi afin de rendre horizontal le plan de référence. Dans un 2nd temps, le plan moyen de la surface usinée est recherché, sous la contrainte qu'il soit parallèle au plan de référence. La profondeur usinée est calculée, ainsi que les variations autour de ce plan usiné moyen.

4. Résultats et discussion

La figure 4 représente les profondeurs mesurées en fonction des paramètres de coupe. Les valeurs de profondeur usinées sont comprises entre $94 \mu\text{m}$ et $364 \mu\text{m}$. La valeur cible de $200 \mu\text{m}$, qui correspond à l'épaisseur d'un pli dans le CMC Ox-Ox, est bien dans cet intervalle. Les valeurs les plus hautes de profondeur usinée sont atteintes pour une valeur haute de pression et basse pour la vitesse et le débit d'abrasif. À l'inverse les plus petites valeurs de profondeur sont atteintes pour une pression et un débit d'abrasif bas et une vitesse haute. Cela peut s'expliquer par le fait que la quantité de matière usinée augmente en fonction du temps d'exposition de la pièce au jet. L'écart-type moyen des profondeurs d'usinage est de l'ordre de $\pm 15 \mu\text{m}$.

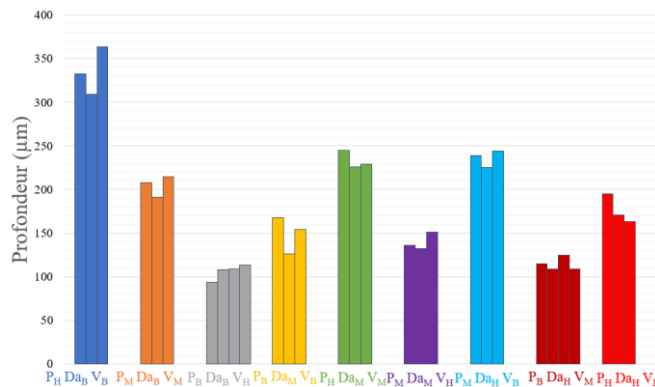


Figure 3 : Valeurs des profondeurs usinées par jet d'eau abrasif, classées par condition d'usinage.

Dans le but de disposer d'un modèle empirique de prédiction de la profondeur usinée sur le CMC Ox-Ox de l'étude, il a été proposé d'adapter la méthode du modèle exponentiel, utilisé dans des études précédentes sur différents matériaux comme les CMO ou les métaux [9], [7]. Une loi puissance sera utilisée pour prédire la profondeur usinée en fonction des trois paramètres étudiés comme suit dans Eq. (1).

$$Prof = \lambda \times P^\alpha \times V^\beta \times Da^\gamma \quad (\text{Eq. 1})$$

La constante λ représente l'usinabilité du matériau CMC Ox-Ox étudiée, et contient en elle toutes les hétérogénéités du matériau. Elle prend également en compte les autres paramètres machine tels que la distance de tir et le pas de balayage par exemple. Les valeurs d'interpolation α , β et γ représentent l'influence de chaque paramètre qui lui est associé sur la profondeur usinée. Ils ont été calculés en minimisant la somme des écarts au carré entre la profondeur expérimentale et la profondeur calculée grâce à l'Eq. 1. Les constantes obtenues sont données dans l'Eq. 2.

$$Prof = 1,7898 \times P^{2,3529} \times V^{-0,8944} \times Da^{-0,3043} \quad (\text{Eq. 2})$$

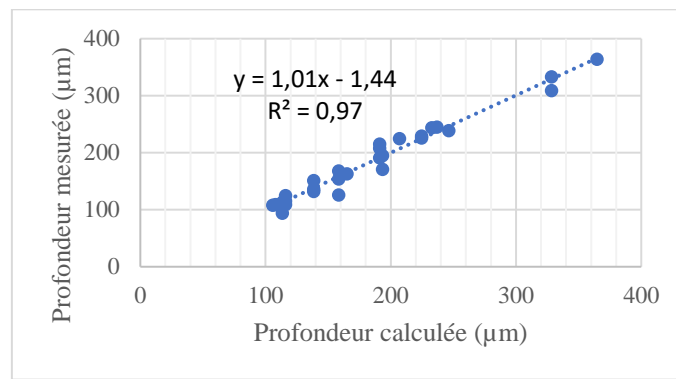


Figure 4 : Valeurs des profondeurs mesurées en fonction des valeurs des profondeurs calculées.

L'écart moyen entre les valeurs expérimentales et calculées via ce modèle est d'environ +/-8 μm , et l'écart maximal observé est de 28 μm . Ce modèle a un coefficient de corrélation de 0,97 (cf Fig. 5). Ces deux arguments indiquent donc que, malgré l'importante hétérogénéité du matériau considéré dans cette étude, il est possible grâce à ce modèle de prédire, avec une précision de l'ordre d'une vingtaine de microns, la profondeur usinée à partir des trois paramètres machine P , V et Da .

Connaissant l'épaisseur d'un pli dans le matériau CMC Ox-Ox de l'étude, de l'ordre de 200 μm , il est donc possible de réaliser un usinage non débouchant dit « pli à pli » par jet d'eau abrasif. Les valeurs d'interpolation permettent d'estimer l'ordre d'influence des paramètres étudiés. Ici, la pression apparaît comme le facteur le plus impactant puis vient la vitesse et enfin le débit d'abrasif. Ces résultats sont cohérents avec ceux de la littérature en ce qui concerne les CMO [10]. Cela confirme également les premières hypothèses faites lors de l'analyse des résultats bruts.

Pour compléter cette étude, des observations au microscope électronique à balayage (MEB) ont été effectuées sur le matériau après usinage (Fig. 6). L'arrachement et la rupture de fibres ainsi que la dégradation de la résine ont pu être observés. Il est également possible de noter des porosités de plusieurs dizaines de micromètres, créées pendant la phase d'usinage, ou potentiellement déjà présentes au sein du matériau initial et mises à jour par l'enlèvement de matière. Enfin, de la contamination avec des grains d'abrasif incrustés dans les surfaces usinées est notée. Ces types de défauts sont également retrouvés lors des usinages de CMO [11], [12].

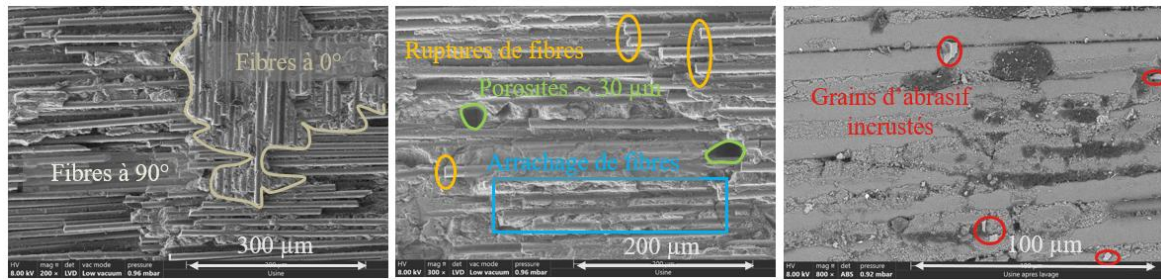


Figure 5 : Observations MEB de surfaces usinées avec trois niveaux de grossissement classés par ordre croissants.

5. Conclusions

Ces travaux ont permis de montrer la faisabilité de l'usinage par jet d'eau abrasif sur CMC Ox-Ox. De plus, il est également possible de prédire la profondeur usinée à partir des paramètres machine, ainsi que d'obtenir des profondeurs retirées assez faibles pour pouvoir réaliser de l'usinage appelé « pli à pli », typiquement adapté à des opérations d'assemblage et de réparation. Comme les différents travaux menés sur l'usinage par jet d'eau abrasif sur d'autres types de matériaux, il ressort également que le paramètre de pression est le plus influent sur la profondeur usinée. Dans le but de maîtriser l'état de surface pour réaliser des assemblages par collage, une caractérisation des états de surface obtenus sera réalisée à partir de plusieurs critères d'ondulation et de rugosité.

Remerciements

Les auteurs remercient Safran Ceramics et IMT Mines Albi pour le financement de ces travaux.

Références

- [1] E. Marin, « Comportement mécanique de composites oxyde/oxyde pour structures aéronautiques », phdthesis, Université de Bordeaux, 2021. Consulté le: 26 septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-03483321>
- [2] M. Haddad, R. Zitoune, H. Bougherara, F. Eyma, et B. Castanié, « Study of trimming damages of CFRP structures in function of the machining processes and their impact on the mechanical behavior », *Compos. Part B Eng.*, vol. 57, p. 136-143, févr. 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.09.051.
- [3] M. Hashish, A. Kotchon, et M. Ramulu, « STATUS OF AWJ MACHINING OF CMCS AND HARD MATERIALS », mai 2015.
- [4] X. Sourd, R. Zitoune, L. Crouzeix, et M. Coulaud, « Influence of the texturing quality consecutive to Abrasive Water Jet machining on the adhesive properties in mode I of 3D woven composite assemblies », *Compos. Part B Eng.*, vol. 242, p. 110091, août 2022, doi: 10.1016/j.compositesb.2022.110091.
- [5] M. Ramulu et D. Arola, « Water Jet and Abrasive Water Jet Cutting of Unidirectional Graphite-Epoxy Composite », *COMPOSITES*, vol. 24, n° 4, p. 299-308, juin 1993, doi: 10.1016/0010-4361(93)90040-F.
- [6] O. Gavalda Diaz, G. Garcia Luna, Z. Liao, et D. Axinte, « The new challenges of machining Ceramic Matrix Composites (CMCs): Review of surface integrity », *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 139, p. 24-36, avr. 2019, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2019.01.003.
- [7] R. Zitoune, F. Collombet, et F. Cénac, « Méthodologie spécifique à l'usinage des composites par jet d'eau abrasif », oct. 2013.
- [8] M. Pillet, « Les plans d'expériences par la méthode TAGUCHI », 2011.
- [9] F. Cénac, F. Collombet, R. Zitoune, et M. Délérès, « Abrasive-water-jet blind-machining of polymer matrix composite materials ».
- [10] X. Sourd, R. Zitoune, L. Crouzeix, M. Salem, et M. Charlas, « New model for the prediction of the machining depth during milling of 3D woven composite using abrasive waterjet process », *Compos. Struct.*, vol. 234, p. 111760, févr. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111760.
- [11] X. Sourd, R. Zitoune, A. Hejjaji, M. Salem, L. Crouzeix, et D. Lamouche, « Multi-scale analysis of the generated damage when machining pockets of 3D woven composite for repair applications using abrasive water jet process: Contamination analysis », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 139, p. 106118, déc. 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.106118.
- [12] A. Hejjaji, R. Zitoune, L. Crouzeix, S. L. Roux, et F. Collombet, « Surface and machining induced damage characterization of abrasive water jet milled carbon/epoxy composite specimens and their impact on tensile behavior », *Wear*, vol. 376-377, p. 1356-1364, avr. 2017, doi: 10.1016/j.wear.2017.02.024.