



HAL
open science

**Respect de l'intégrité dans l'usinage non-débouchant par
jet d'eau abrasif de matériaux composites = Material
integrity maintain while milling composite using
abrasive water jet**

François Cénac, Francis Collombet, Redouane Zitoune, Michel Délérís

► **To cite this version:**

François Cénac, Francis Collombet, Redouane Zitoune, Michel Délérís. Respect de l'intégrité dans l'usinage non-débouchant par jet d'eau abrasif de matériaux composites = Material integrity maintain while milling composite using abrasive water jet. JNC16, Jun 2009, Toulouse, France. 6 p. hal-00430606

HAL Id: hal-00430606

<https://hal.science/hal-00430606>

Submitted on 9 Nov 2009

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.

Respect de l'intégrité dans l'usinage non-débouchant par jet d'eau abrasif de matériaux composites

Material integrity maintain while milling composite using abrasive water jet

François Cénac^{1&2}, Francis Collombet², Rédouane Zitoune², Michel Déléris¹

1 : JEDO Technologies
Rue du Chêne Vert - BP 78204
31682 Labège Cedex France
e-mail : fcenac@jedotechnologies.net

2 : Université de Toulouse ; INSA ; UPS ; Mines Albi, ISAE
ICA (Institut Clément Ader)
133c, avenue de Ranguéil, F-31077 TOULOUSE France
e-mail : francis.collombet@iut-tlse3.fr

Résumé

La technologie jet d'eau abrasif (JEA) prend de plus en plus de place pour la découpe des matériaux composites. En effet, elle permet l'obtention d'une bonne qualité de découpe tout en préservant l'intégrité des matériaux. Différents travaux explicitent comment le JEA peut être utilisé pour l'usinage non-débouchant de matériaux métalliques. Par contre, très peu d'études portent sur l'usinage non débouchant par JEA des matériaux composites. Faisant suite à un article explicitant les grandes lignes concernant ce procédé nouveau, ce document vise à expliciter les requis en terme d'intégrité matière.

Pour les composites, le défaut majeur d'intégrité matière est le délaminage. Il est provoqué par une trop grande énergie de l'eau, qui provoque un délaminage mode I lors de l'impact. Afin d'évaluer ce phénomène, un plan d'expériences factoriel complet est utilisé en faisant varier les principaux paramètres machine sur huit matériaux composites différents. A l'aide d'un premier critère visuel, cette étude permet d'évaluer l'influence des paramètres machine sur le risque de délaminage. Il apparaît que les paramètres influents sont : le diamètre de buse, le débit d'abrasif et la pression alors que la vitesse d'avance et le diamètre de canon influencent peu le risque de délaminage.

Abstract

The Abrasive Water jet Technology (AWJT) is currently widely used for cutting composite materials. Indeed, it leads to a good kerf quality without penalizing the material integrity. Several studies explain how the AWJ may be used for blind-machining. But few of them deal with composite material and, more specifically, with the respect of material integrity. The main material integrity default is the delamination. It occurs the water energy is too high while it machines the part. A complete factorial experimental design is presented through this paper. It was used to evaluate the influence of the AWJ machining main parameters on the delamination risk. It appears that the orifice diameter, the water pressure and the abrasive mass flow rate are influent on delamination whereas the feed rate and the focusing tube diameter are almost neutral.

Mots Clés : Jet d'eau abrasif, usinage, intégrité matière

Keywords: Abrasive Waterjet, milling, material integrity

1. Introduction

La technologie Jet d'Eau Abrasive (JEA) s'adapte bien aux spécificités des matériaux composites, en complément des technologies par outil coupant et abrasion. En effet, de nombreuses études [1-2] et de nombreuses applications industrielles, en aéronautique notamment, mettent en exergue les avantages de cette technologie. On peut noter :

- peu d'effort induit sur la pièce usinée;
- une faible zone affectée thermiquement;
- une grande vitesse de découpe;
- peu de système de fixation ;
- pas d'usure d'outil;
- pas de risque de délaminage.

Quelques travaux [2] explicitent comment le JEA peut être utilisé pour l'usinage non-débouchant. Par contre, très peu d'études portent sur l'usinage non débouchant par JEA des matériaux composites. Une étude menée par M. Hashish [3] en 1999 traite de l'usinage non-débouchant par JEA pour la réparation de pièces composites. Le pelage pli par pli y apparaît facilité par JEA, mais peu d'accent est mis sur l'intégrité matériaux. De plus, cette étude nécessite une technologie spécifiquement dédiée qui en limite le domaine d'application.

La présente étude est menée en collaboration entre un laboratoire (le LGMT, maintenant l'ICA pour Institut Clément Ader), et une PME de découpe par JEA (JEDO Technologies). Il s'agit d'une première approche de la notion d'intégrité de matériaux composites usinés par JEA. On y examine comment le réglage des principaux paramètres machine (pression d'eau, diamètre de buse, débit d'abrasif, vitesse d'avance) influent sur le risque de délaminage de huit matériaux composites divers.

2. De la découpe à l'usinage par JEA

Afin de restituer le vocabulaire, et donner des ordres de grandeur liés à la découpe par JEA, la technologie JEA utilise un jet d'eau à grande vitesse (750 m/s) obtenu par de l'eau sous pression (4000 bar) passant par un orifice (de 0,3 mm de diamètre). Un grenat (120 mesh) est alors introduit dans le jet (débit de 350 g/min). Il est ensuite accéléré par l'eau dans un canon de focalisation (de 0,8 mm de diamètre) avant d'être projeté sur la pièce à découper. L'enlèvement de matière s'effectue alors par micro incision et par micro impact, comme explicité dans le modèle d'érosion de Finnie [5]. Le résultat d'usinage dépend alors de la répartition d'énergie du jet entre respectivement, l'énergie de l'eau (conduisant au délaminage) et l'énergie d'abrasif (comprenant un mode d'érosion par incision et un autre par impact), et la façon qu'a la matière de dissiper ces différentes formes d'énergie.

Pour réaliser un usinage non débouchant (à la différence d'une découpe), l'énergie est réduite en diminuant la puissance du jet (par une réduction de diamètre de buse et/ou de pression) et/ou en diminuant le temps d'exposition du matériau (par une augmentation de vitesse d'avance). La hauteur de coupe est aussi augmentée afin de laisser le jet diverger. L'incision large ainsi créée dans la pièce est alors reproduite par un balayage jusqu'à l'obtention de la forme souhaitée. Afin d'épargner la pièce lors des phases d'accélération et de décélération de la machine, un masque (sous forme d'un pochoir métallique) délimite l'usinage final (cf. Figure 1).

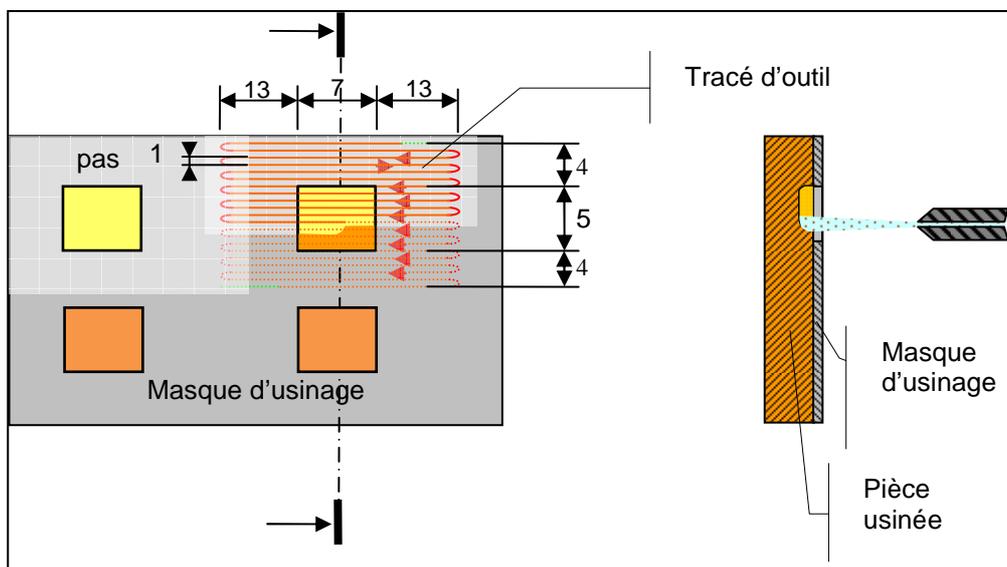


Fig. 1. Schéma de description des usinages non-débouchants pour le plan d'expériences.

Comme l'usinage des composites diffère principalement de l'usinage des autres matériaux par son risque de délaminage, la technologie JEA doit parfaitement contrôler la part d'énergie du jet liée aux particules abrasives (ne provoquant pas de délaminage) et la part d'énergie contenue par l'eau (pouvant conduire au délaminage par effet de coin entre les plis). Une fois l'intégrité du matériau composite garantie, l'usinage par jet d'eau facilite le pelage pli par pli. En effet, le JEA usine une profondeur constante par rapport à la surface supérieure de la pièce, alors que les outils coupants et abrasifs usinent une côte constante par rapport à une référence. De plus, comme il a été montré dans une étude précédente, la profondeur usinée par JEA dépend très peu de la hauteur de coupe [4]. L'enlèvement d'un pli sur une pièce légèrement cintrée ne nécessite pas de suivre le profil de la pièce. Mais avant de disposer de ces

possibilités qui complètent les procédés plus conventionnels, il est nécessaire de garantir l'intégrité du matériau.

3. Présentation du protocole expérimental

Afin d'évaluer les risques de délaminage après usinage de matériaux composites par JEA, un plan d'expériences factoriel complet est réalisé tel que suit :

- Paramètres machine variables :
 - Pression p (1000 et 2000 bar) ;
 - Vitesse d'avance f (5250 et 6200 mm/min) ;
 - Diamètre de buse db (0.25 et 0.3 mm) ;
 - Diamètre de canon ca (0.76 et 1.02 mm) ;
 - Débit d'abrasif da (50 et 100 g/min).
- Paramètres machine fixes :
 - Hauteur de coupe (100 mm) ;
 - Pas de balayage (1 mm) ;
 - Longueur de canon (10.16 mm).
- Matériaux étudiés :
 - Fibre de carbone / époxy RTM6T700 empilement quasi-isotrope 20 plis ;
 - Fibre de carbone / époxy M21T700 empilement quasi-isotrope 20 plis ;
 - Fibre de carbone / époxy M21T700 empilement UD 20 plis ;
 - Fibre de verre / époxy HexFIT 8 plis autoclave ;
 - Fibre de verre / époxy HexFIT 8 plis étuve ;
 - Satin de verre / époxy ;
 - Satin de verre / DBF ;
 - Taffetas de carbone / époxy.

Notons que les paramètres machine sont délibérément choisis afin que de nombreux réglages conduisent au délaminage. Afin de faciliter la mise en position des éprouvettes et la constance de la hauteur de coupe malgré des épaisseurs de matériaux différentes, les éprouvettes sont moulées dans de la résine (cf. Figure 2).

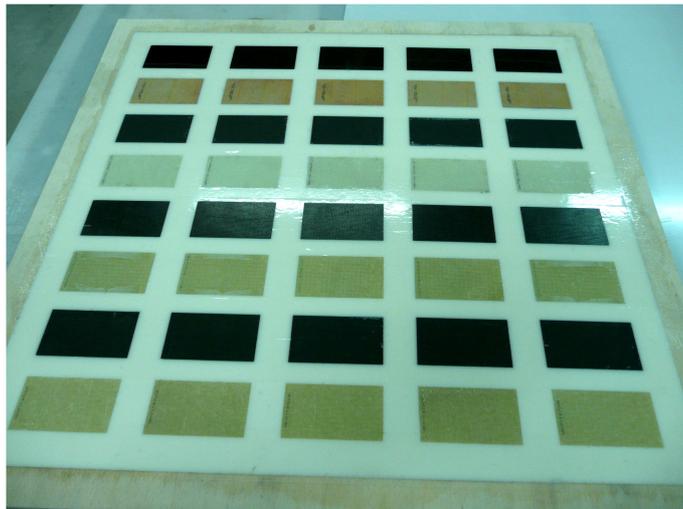


Fig. 2. Photo du moulage des éprouvettes avant usinage.

Ce plan d'expériences conduit à 256 essais réalisés sur une machine flying bridge équipée d'une pompe Hyplex 4000 bar de la société Flow Corp. (cf. Figure 3).



Fig. 3. Photo d'un usinage par JEA (Jedo Technologies).

Une fois les essais réalisés, les usinages sont observés afin de déterminer s'il y a eu délaminage (cf. Figure 4). Il est alors possible d'évaluer le risque de délaminage pour un réglage machine en divisant le nombre de poches délaminées par le nombre de poches réalisées avec le réglage.

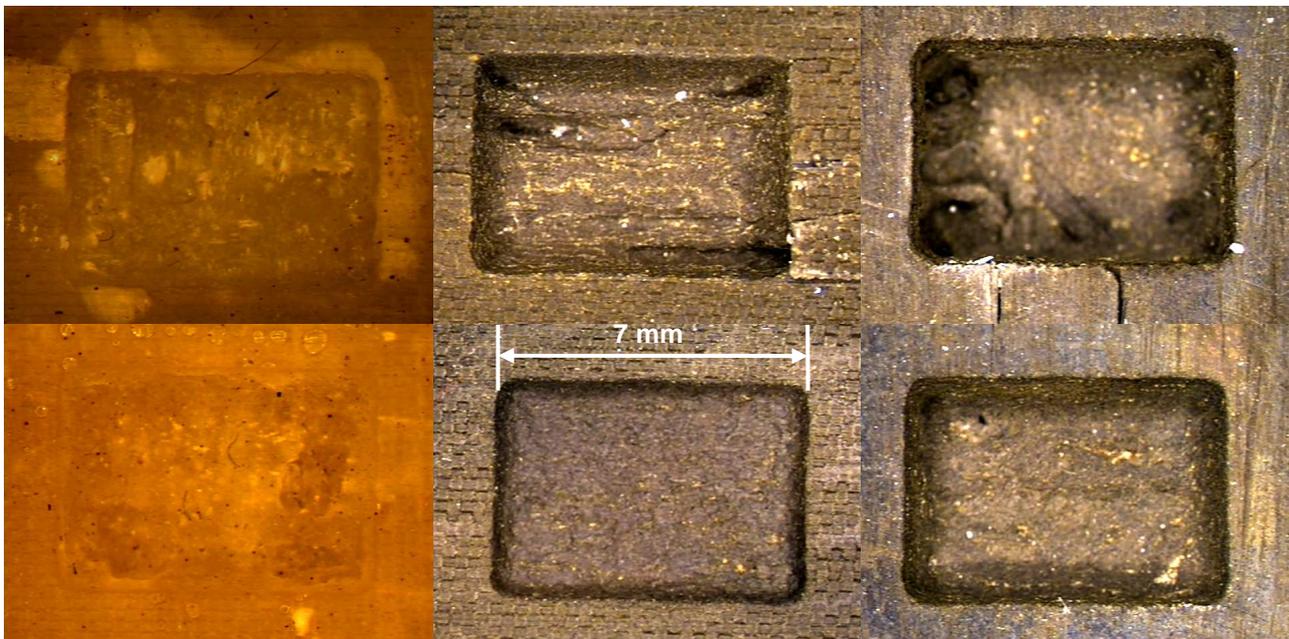


Fig. 4. Photos de certaines poches : de gauche à droite, observation d'un HexFIT™ réalisé en étuve, un M21-T700 UD réalisé en autoclave, et un T700-RTM6 (poches du haut délaminées, et les poches du bas saines).

4. Présentation des résultats

4.1 Influence des paramètres machine

La Figure 5 représente l'évolution du risque de délaminage en fonction des principaux paramètres machine utilisés dans le plan d'expériences.

Il apparaît que les paramètres « vitesse d'avance » et « diamètre du canon » ne sont pas influents sur le risque de délaminage. Par contre, les paramètres « pression », « diamètre de buse » et « débit d'abrasif » ont une influence significative. Le risque de délaminage est donc lié à la puissance du jet et la répartition de cette puissance entre le fluide et les particules abrasives.

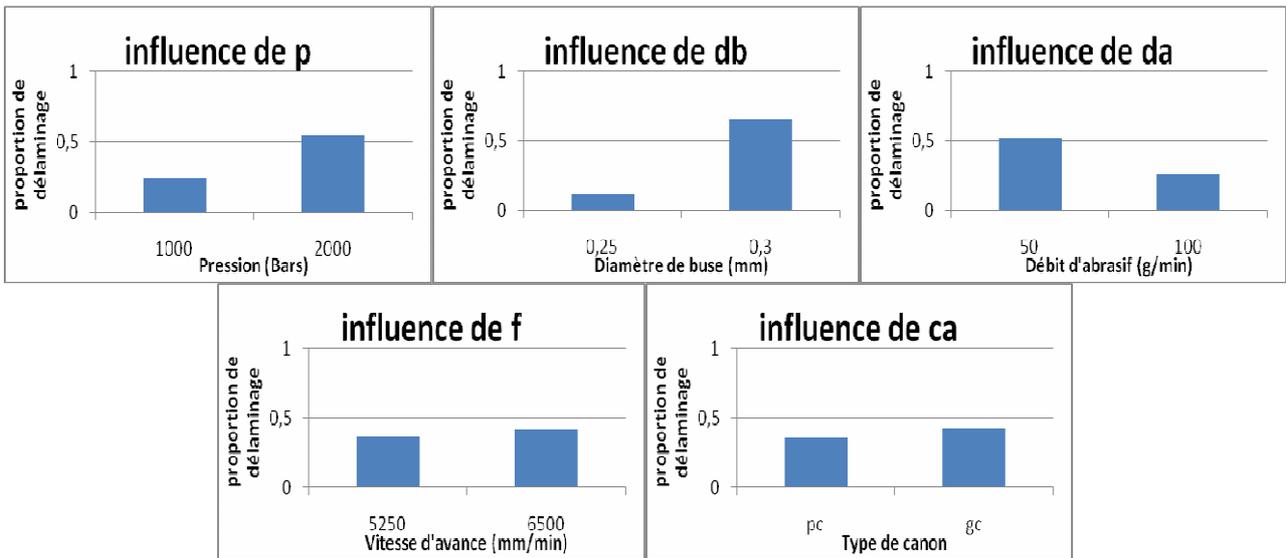


Fig. 5. Graphiques explicitant l'influence des principaux paramètres machine sur le risque de délaminage.

En effet, le délaminage est associé à l'énergie de l'eau car cette dernière agit comme un effet coin dans les micro-fissures en surface de la matière usinée (cf. Figure 6).

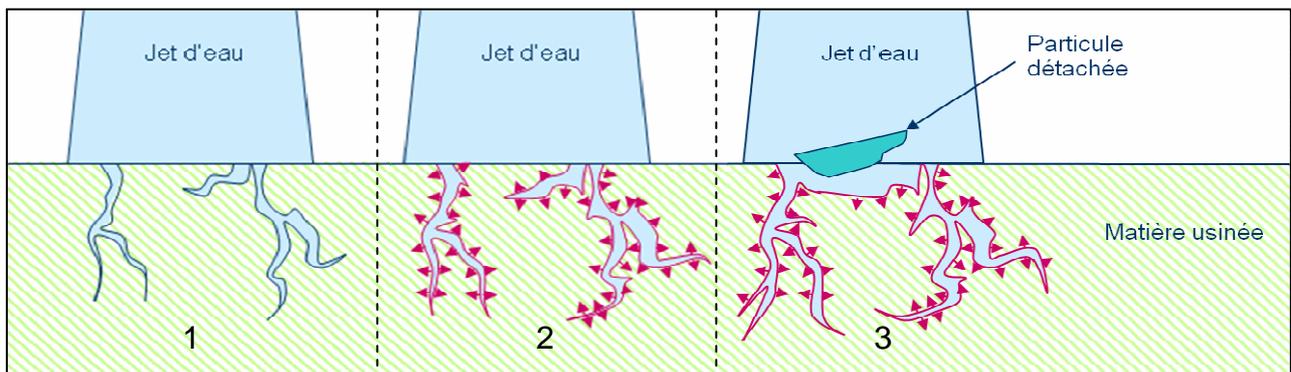


Fig. 6. Schéma en 3 étapes de l'érosion à l'eau pure par effet coin.

Ce mode d'érosion conduit facilement à du délaminage car, entre les plis, la contrainte de propagation de fissure est plus réduite, et les micro-fissures et porosités sont fréquentes. Par contre, les particules abrasives n'ont qu'un effet local (cf. Figure 7) qui ne conduit pas à du délaminage. Or comme la puissance est initialement introduite dans le jet par l'eau, il est donc nécessaire de régler le débit d'abrasif afin que son accélération dans le tube de focalisation enlève suffisamment d'énergie à l'eau pour éviter le délaminage.

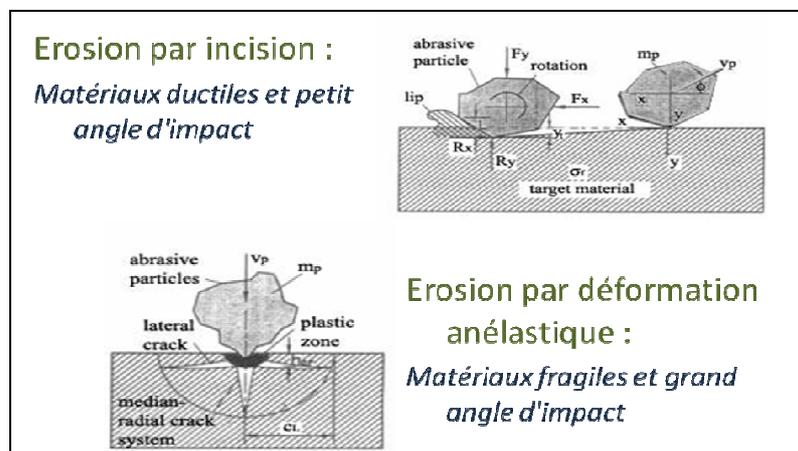


Fig. 7. Schéma de l'érosion à l'abrasif par incision et/ou déformation anélastique.

5. Conclusion

Cette étude vise à mettre en évidence l'importance des principaux paramètres machine dans le risque de délaminage. Il apparaît que, dans le domaine du plan d'expériences présenté, la pression, le diamètre de buse, et le débit d'abrasif sont influents alors que la vitesse d'avance et le diamètre du canon ne le sont pas. Le délaminage est donc plus lié à la puissance du jet qu'à son énergie, et à la répartition de l'énergie entre le fluide et l'abrasif. Afin de coller au risque de délaminage, le paramètre débit d'abrasif ne doit donc pas être considéré dans les études comme une valeur absolue, mais par sa capacité à enlever de la puissance à l'eau.

Cette étude préliminaire est en ce moment même prolongée par diverses études plus approfondies visant à définir un paramètre machine représentant le débit d'abrasif et tenant compte des observations de cette étude afin de faciliter l'étude de l'intégrité des matériaux composites usinés par JEA. Une autre étude doit approfondir les résultats déjà obtenus en rajoutant des observations au microscope électronique à balayage.

L'usinage non-débouchant des composites par JEA permet un pelage industriel, pli par pli, des matériaux composites. L'étude de ce procédé méconnu est actuellement très limitée au regard de ses capacités dans le monde des composites.

Remerciements

Cette étude a été financée dans le cadre de l'appel à projet EPICEA (Emergence de Projets Innovants Composite portés par des Entreprises Aéronautiques) lancé en juillet 2006, par l'Etat (DRIRE) et le Conseil Régional Midi-Pyrénées et abondée par le Conseil Général de Haute Garonne. Il s'agit du projet UJEC (Usinage par Jet d'Eau des Composites) porté par la PME Jedo Technologies (31).

Références

- [1] J. Wang, « Abrasive Waterjet Machining of Polymer Matrix Composites _ Cutting Performance, Erosive Process and Predictive Models », *International Journal of Advanced Machining Technology*, Vol. 15, pp 757-768, 1999.
- [2] M. Hashish, « Status and potential of waterjet machining of composites », *Proceedings of 10th American Waterjet Conference*, Huston, Texas, paper 64, 1999.
- [3] C. Dunsky, P. Tacheron, M. Hashish, « Waterjet techniques for composite material jet engine component repair. Phase 1 », *Research program final report, Defense Technical Information Center*, 1996.
- [4] F. Cénac, F. Collombet, R. Zitoune, M. Délérès, « Abrasive-water-jet blind-machining of polymer matrix composite materials », *Proceedings of ECCM 13*, Stockholm, Sweden, paper 1728, 2008.
- [5] I. Finnie, « The mechanism of erosion of ductile metals », *Journal of Engineering Material and Technology*, p. 527-532.