



HAL
open science

Etude expérimentale et numérique de l'usinage des structures composites en nid d'abeilles Nomex®

Mohamed Jaafar, Hamid Makich, Samir Atlati, Mohammed Nouari, Benjamin Julliere

► To cite this version:

Mohamed Jaafar, Hamid Makich, Samir Atlati, Mohammed Nouari, Benjamin Julliere. Etude expérimentale et numérique de l'usinage des structures composites en nid d'abeilles Nomex®. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01621614

HAL Id: hal-01621614

<https://hal.science/hal-01621614v1>

Submitted on 23 Oct 2017

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.

Etudes expérimentale et numérique de l'usinage des structures composites en nid d'abeilles Nomex®

Experimental and numerical study of the machining of Nomex® honeycomb composite structures

Mohamed Jaafar¹, Hamid Makich¹, Samir Atlati¹, Mohammed Nouari¹, Benjamin Jullière²

1 : Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, LEMTA CNRS-UMR 7563,
Ecole des Mines de Nancy, Ecoles des Mines d'Albi, GIP-InSIC,
27 rue d'Hellieule, 88100, Saint Dié des Vosges, France.
e-mail : mohammed.nouari@univ-lorraine.fr

2 : Evatec-Tools,
12 rue des Terres Rouges - Z.I. Metzange - F - 57100 Thionville.
e-mail : benjamin.julliere@evatec-tools.fr

Résumé

L'usinage des structures nid d'abeilles Nomex® représente un verrou technique et scientifique pour les applications aéronautiques. Les difficultés rencontrées lors de l'usinage de ce type de matériau sont liées à la faible épaisseur des parois constituant les cellules alvéolaires, la nature composite du papier formant le Nomex® et la faible densité de ce type de structures. Dans ce travail, une modélisation numérique 3D de l'usinage par fraisage des structures nid d'abeilles Nomex® a été développée pour analyser et optimiser le processus de coupe. Une validation expérimentale du modèle a également été faite à travers des essais de fraisage avec différentes conditions de coupe. Un suivi des efforts de coupe et des observations de la qualité de surface usinée ont été effectués.

Abstract

The machining of Nomex® honeycomb structures represents a technical and scientific challenge for aeronautical applications. The difficulties encountered during the machining of this type of materials are linked to the small thickness of the walls constituting the alveolar honeycomb cells, the composite nature of the paper forming the Nomex® and the low density of this type of structure. In the current work, a 3D numerical modeling of the machining of Nomex honeycomb structures has been developed to analyze and optimize the cutting process. Thus, an experimental validation of the model was also carried out through milling tests with different cutting conditions. A follow-up of the cutting forces and observations of the machined surface quality have been carried out.

Mots Clés : Nid d'abeilles, Nomex®, Fraisage, Modélisation numérique, Critère de Tsai-Wu

Keywords : Honeycomb, Nomex®, Milling, Numerical modeling, Tsai-Wu criterion

1. Introduction

Les structures sandwich en nid d'abeilles Nomex® sont principalement caractérisées par une haute résistance à la compression et une faible densité. De plus, elles possèdent une bonne résistance thermique, de bonnes propriétés isolantes et de faibles propriétés diélectriques. Grâce à ces caractéristiques, le matériau Nomex® est de plus en plus utilisé dans les applications aéronautiques et aérospatiales. Par exemple, ce type de matériau est employé dans les planchers, les portes, les volets et les gouvernails des avions [1]. L'utilisation du matériau Nomex® comme l'âme des structures sandwich en nid d'abeille peut nécessiter des opérations d'usinage comme le perçage ou le fraisage. Toutefois, ce matériau présente plusieurs verrous liés à sa mise en forme. Trois caractéristiques spécifiques du nid d'abeilles Nomex® entraînent des difficultés d'usinage : (i) il est élaboré à partir d'un matériau composite constitué de fibres d'aramide et de résine phénolique, (ii) le Nomex® se caractérise par une épaisseur mince de ses parois et (iii) la géométrie cellulaire de la

structure en nid d'abeilles. Pour surmonter ces problèmes, l'utilisation de l'eau gelée ou d'une résine therm durcissable a souvent été employée dans la littérature pour solidifier la structure et éviter la déformation et la vibration des cellules [2, 3]. Cependant, ces méthodes génèrent des coûts supplémentaires et un temps de mise en œuvre très important. En outre, les études montrant l'influence des conditions de coupe sur l'usinabilité de ce type de matériaux sont absentes de la bibliographie. L'optimisation du processus d'usinage des structures en nid d'abeilles est encore confidentielle. L'optimisation doit faire l'objet d'une compréhension des interactions qui se produisent lors de l'usinage du nid d'abeilles. La modélisation par éléments finis semble être adéquate pour suivre les phénomènes locaux qui se produisent lors de la mise en forme.

Beaucoup d'études par éléments finis ont proposé la modélisation de l'impact ou de la compression hors-plan des structures en nid d'abeilles. Deux méthodes sont utilisées pour modéliser le comportement des nids d'abeilles, la première est basée sur l'homogénéisation de la structure afin d'étudier le comportement mécanique sous différents chargements [4], le second modèle réplique la géométrie réelle de la structure nid d'abeilles par la présentation des cellules pour obtenir plus d'informations sur la déformation des parois du nid d'abeilles.

Dans le cas du matériau nid d'abeilles dont les parois sont composées de papier Nomex® (fibres d'aramide et résine phénolique), quatre approches de modélisation existent. La première consiste à attribuer un comportement isotrope élasto-plastique aux parois [5-9]. Ce modèle est facile à mettre en œuvre. Cependant, il néglige l'architecture composite du papier Nomex®. La deuxième méthode est basée sur une modélisation orthotrope du papier Nomex®, ce qui représente plus de possibilités de modélisation du papier Nomex® [10-14]. Dans la troisième approche, le papier Nomex® est modélisé à l'aide d'une structure multicouches par la représentation de trois couches avec un comportement isotrope pour le revêtement en résine phénolique (deux couches de revêtement en résine) et le papier aramide, ce dernier est modélisé comme un matériau isotrope ou orthotrope [13, 15, 16]. Enfin, le papier Nomex® est modélisé à l'aide d'une structure multicouches avec l'addition de l'accumulation de résine dans les coins des cellules. Toutes ces études traitent le comportement mécanique des structures en nid d'abeilles sous contraintes mécaniques telles que la compression hors-plan, le cisaillement et l'impact.

L'usinage du nid d'abeilles Nomex® est confronté de la même manière que les matériaux composites classiques au problème de l'endommagement induit pendant le processus de formation de copeaux. De nombreux critères de rupture sont proposés pour les structures composites [17]. Tout d'abord, les critères de rupture non interactifs [18] qui sont divisés en deux parties : la loi de contraintes maximales et la loi de déformations maximales. Ces deux critères considèrent que le composite est endommagé lorsque la contrainte ou la déformation dépasse les limites imposées. Cette façon de faire est un moyen simple et direct de prédire la rupture des composites. D'autres critères de rupture interactifs [18] ont été développés pour tenir compte des interactions entre les différentes contraintes, Tsai-Wu et Tsai-Hill sont les exemples de critères les plus connus dans le domaine des composites. Enfin, il existe également les critères des modes séparés [18] qui différencient les modes de défaillance contrôlés par les fibres et la matrice. Le critère de Hashin est l'un de ces critères.

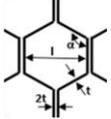
Dans cette étude, une approche de modélisation par éléments finis du processus de coupe du nid d'abeilles en Nomex® est proposée. L'objectif est d'étudier l'usinabilité de cette structure Nomex® et l'effet des paramètres de coupe sur ce matériau. Par la suite, une confrontation des résultats de la modélisation est réalisée avec des travaux expérimentaux d'usinage du nid d'abeille Nomex®.

2. Présentation de l'approche développée

Afin d'étudier les spécificités de l'usinage des structures en nid d'abeilles, constituant l'âme des matériaux sandwichs, on propose dans ce travail de corréler entre des études expérimentale et numérique de l'opération de fraisage. L'objectif est de suivre les interactions entre ces structures composites et les outils de coupe en fonction des conditions d'usinage. Dans ce paragraphe on présente la démarche utilisée pour conduire cette étude.

2.1 Matériaux et outils étudiés

Les essais de fraisage ont été réalisés sur le matériau d'âme des structures sandwichs. Le matériau nid d'abeilles utilisé est le Nomex® qui est composé de fibres d'aramide et d'une résine phénolique. Les principales caractéristiques géométriques de la structure en nid d'abeilles sont présentées dans le tableau 1. Le tableau 2 résume les caractéristiques mécaniques fournies par le fabricant.

Désignation du Nid d'abeille	Taille de cellule l [mm]	Densité [Kg/m ³]	Epaisseur de la paroi t [mm]	Angle α
A10-48-3 	3,2	48	0,06	120

Tab. 1. Caractéristiques géométriques du nid d'abeilles Nomex®.

Désignation du Nid d'abeille	Compression		Cisaillement			
	Résistance [MPa]	Module [MPa]	Résistance direction L [MPa]	Module direction L [MPa]	Résistance direction W [MPa]	Module direction W [MPa]
A10-48-3	2,4	138	1,25	40	0,73	25

Tab. 2. Caractéristiques mécaniques du nid d'abeilles.

L'usinage des structures en nids d'abeilles demande des outils spécifiques avec une géométrie très particulière. Dans le cas de cette étude un outil combiné a été utilisé. Il est composé de deux parties : une partie inférieure constituée d'un disque conique en carbure de tungstène avec un diamètre de 18,3 mm et des bords lisses ayant un angle de coupe de 22° et un angle de dépouille de 2,5°. Une partie supérieure constituée d'un corps cylindrique en acier rapide de diamètre 16 mm constitué de dix hélices contenant des brises copeaux. Ces deux parties sont mécaniquement reliées l'une à l'autre par une vis de serrage. L'outil de coupe est représenté sur la figure 1.

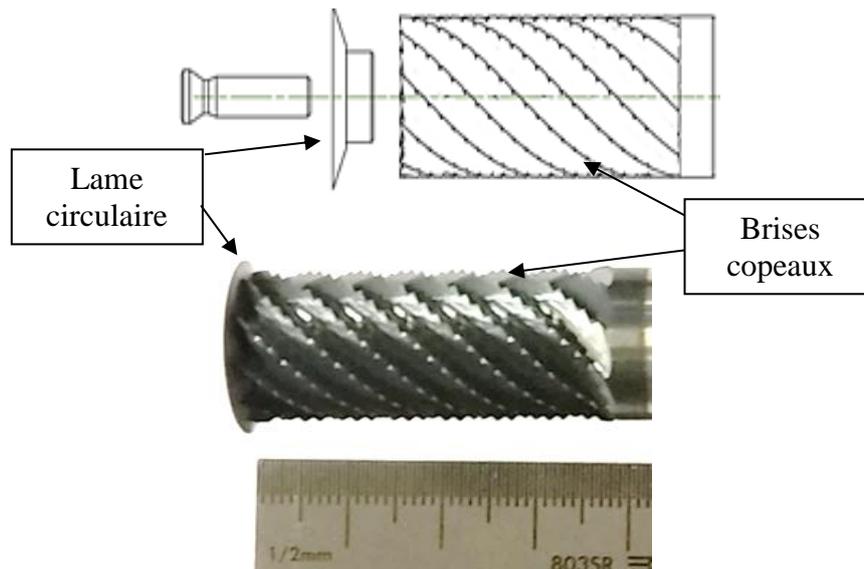


Fig. 1. Outil combiné pour le fraisage des matériau nid d'abeilles.

2.2 Etude numérique de l'opération de fraisage

Le modèle numérique d'usinage du nid d'abeilles est développé à l'aide du code d'éléments finis ABAQUS / EXPLICIT. La pièce à usiner est constituée d'une structure en nid d'abeilles Nomex®, dont les caractéristiques géométriques sont représentées dans le tableau 1. Pour analyser l'interaction du nid d'abeilles avec l'outil de fraisage, la structure modélisée est composée de 10×8 lignes de cellules (Figure 2.a). Le nid d'abeilles est modélisé à l'aide des éléments coques (S4R). La taille des éléments de maillage est d'environ $5\mu\text{m}$.

Le modèle développé tient compte de l'orthotropie du papier Nomex® composant les parois des cellules de la structure en nid d'abeilles. Ainsi, étant donné la différence des propriétés mécaniques suivant les directions considérées, notre modèle prend en compte les orientations du papier Nomex® dans les cellules hexagonales. De ce fait, un repère local est défini pour chaque orientation des parois des cellules (Figure 2.b). Trois repères locaux sont introduits, un repère pour les parois doubles, et deux repères pour les parois simples selon leurs dispositions.

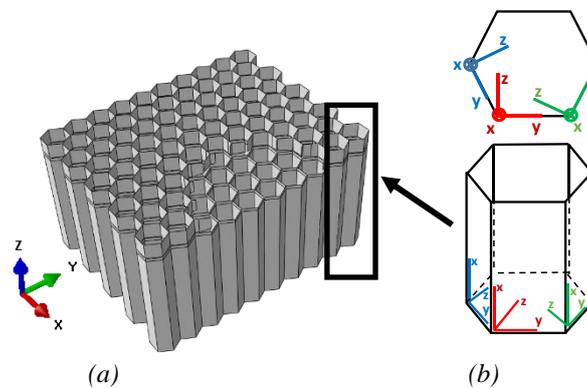


Fig. 2. (a) Modélisation du nid d'abeilles Nomex®, (b) repères locaux pour les parois cellulaires.

Pour l'outil de coupe, un comportement rigide lui a été attribué. Un point de référence RP a été défini au centre de l'outil afin d'appliquer les conditions de coupe ; La vitesse de rotation et la vitesse d'avance (Figure 3.a). Afin de réduire le temps de calcul CPU, un engagement initial de l'outil a été défini. L'objectif est d'assurer un contact complet entre l'outil et la structure du matériau dès le début de la simulation. En outre, l'engagement initial est conçu en tenant compte de la géométrie particulière des deux parties de l'outil, Figure 3.b.

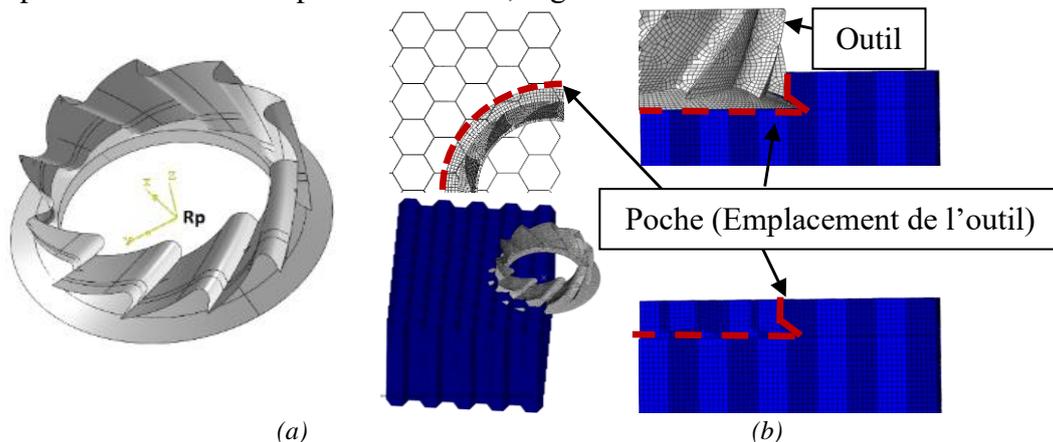


Fig. 3. (a) Outil de coupe ; (b) Engagement initial de l'outil dans la pièce.

2.3 Critère de rupture et model de la chute des rigidités pour la formation des copeaux

Le modèle 3D développé est basé sur la modélisation d'une couche unique pour les parois des nids d'abeilles, ainsi, un comportement orthotrope est attribué aux parois. Cette approche est basée sur l'homogénéisation du papier composite Nomex® (fibre d'aramide et résine phénolique). Cette

orthotropie est représentée par une différence de comportement mécanique du papier Nomex® dans chaque direction [10]. Pour ces raisons, et comme cité plus haut, une orientation locale a été attribuée à chaque parois des cellules. Compte tenu de la fabrication atypique de ce matériau, le papier Nomex® a plus de fibres alignées dans le sens du roulement [9, 11, 14]. Cela donne une plus grande résistance dans cette direction. Les propriétés du comportement mécanique de notre modèle de matériau Nomex® sont basées sur les travaux de S.V. Kilchert [15], qui a identifié l'ensemble des paramètres pour le papier Nomex®.

Propriétés mécaniques	Valeurs
Modules de Young : E1 (MPa)	9200
E2 (MPa)	8300
E3 (MPa)	4700
Coefficients de Poisson, ν_{12} , ν_{13} , ν_{23}	0,35
Modules de cisaillement : G12 (MPa)	2600
G13 (MPa)	2600
G23 (MPa)	1700
Résistance à la traction longitudinale : X_t (Mpa)	111
Résistance à la compression longitudinale : X_c (Mpa)	53
Résistance à la traction transversale : Y_t (Mpa)	98
Résistance à la compression transversale : Y_c (Mpa)	47
Résistance au cisaillement dans le plan : S (Mpa)	159
Densité, ρ g / cm ³	1,3

Tab. 3. Propriétés mécaniques du papier Nomex® utilisé dans la modélisation numérique [15].

En raison du comportement orthotrope du Nomex®, le critère de rupture de Tsai-Wu [5, 19] a été adopté pour prédire l'initiation et l'évolution de l'endommagement dans le papier Nomex®. Le critère de Tsai-Wu est défini pour chaque orientation de paroi selon l'équation suivante :

$$F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_3\sigma_{33} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + F_{33}\sigma_{33}^2 + F_4\sigma_{23}^2 + F_{55}\sigma_{13}^2 + F_{66}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} + 2F_{13}\sigma_{11}\sigma_{33} + 2F_{23}\sigma_{22}\sigma_{33} = 1 \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec :

$$F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} ; F_2 = F_3 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} ; F_{11} = \frac{1}{X_t X_c} ; F_{22} = F_{33} = \frac{1}{Y_t Y_c} ; F_{44} = \frac{1}{S_{23}^2} ; F_{55} = F_{66} = \frac{1}{S_{12}^2} ; F_{13} = F_{12} = -\frac{\sqrt{F_{11} F_{22}}}{2} ; F_{23} = -\frac{\sqrt{F_{22} F_{33}}}{2}$$

Dès que le critère de rupture de Tsai-Wu est atteint, une chute de rigidités est introduite pour tenir compte de l'effet de l'endommagement sur le comportement global du matériau en cours d'usage. L'endommagement des parois de nid d'abeilles est couplé à une chute progressive du module de Young dans la direction précédemment identifiée par le critère de rupture. L'endommagement est caractérisé par six coefficients de dégradation notés d_i comme le montre l'équation suivante, [20] :

$$d_i = 1 - \exp \left[-\frac{1}{m_i e} \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{fi}} \right)^{m_i} \right] \quad (\text{Eq. 2})$$

Avec m : paramètre d'adoucissement
 e : nombre d'Euler
 ε_{fi} : déformation à la rupture

3. Résultats et discussions

L'objectif de la modélisation des structures en nid d'abeilles est d'étudier l'interaction entre la structure et l'outil lors de l'usinage des cellules en nid d'abeilles. Afin de valider notre modèle, plusieurs essais de fraisage ont été effectués sur le Nomex® et une comparaison des efforts de coupe obtenus a été effectuée.

3.1 Validation du modèle EF

Pour effectuer la comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux, trois vitesses de rotation ont été choisies pour une vitesse d'avance. Les conditions d'usinage sont résumées dans le tableau 3.

Vitesse d'avance (mm/min)	1000
Vitesse de rotation (rpm)	10000, 15000, 23000

Tab. 3. Conditions d'usinage.

La figure 4 montre un exemple d'évolution des efforts de coupe F_x , F_y et F_z lors de l'usinage d'une rangée de cellules. Une confrontation est réalisée entre les efforts mesurés expérimentalement à l'aide d'une table dynamométrique KISTLER et les efforts numériques du modèle éléments finis. Les courbes montrent des oscillations lors de l'usinage. Ces oscillations sont attribuées à l'effet de la structure alvéolaire du nid d'abeille. Pour la suite de l'analyse, un traitement des signaux enregistrés est réalisé afin de confronter les valeurs moyennes des données expérimentales à celles issues de la simulation numérique.

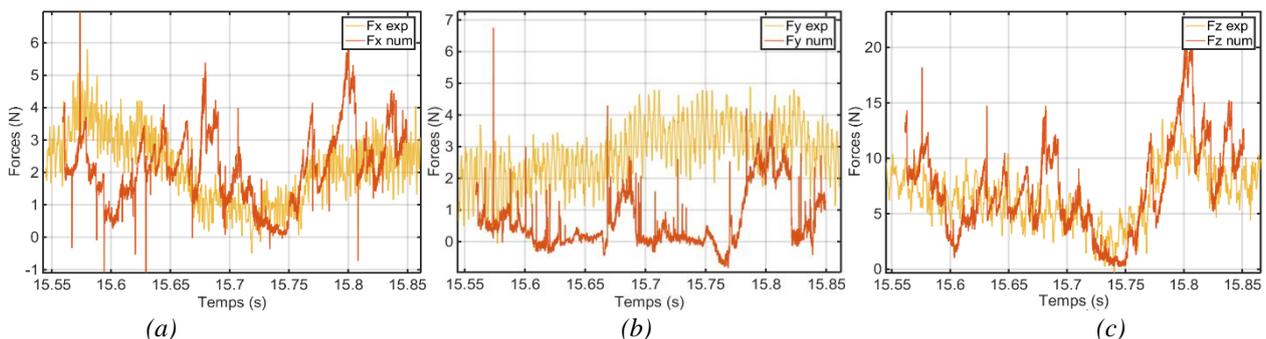


Fig. 4. Evolution des efforts de coupe pour une rangée de cellules de nid d'abeilles (3,2mm) pour $f= 1000$ mm/min, $N=15000$ tr/min : (a) F_x ; (b) F_y ;(c) F_z .

La figure 5 montre l'évolution des efforts de coupe en fonction des conditions d'usinage. Ainsi, contrairement au fraisage des matériaux composites (CFRP, GFRP), Les efforts de coupe sont faibles, et ne dépassent pas les 12 N. Ces faibles valeurs sont causées par la faible densité du matériau nid d'abeilles qui est de l'ordre de 5% de la densité d'un matériau plein. Il est à remarquer aussi que l'effort de coupe F_z est l'effort dominant comparé à F_x et F_y , ceci est contradictoire avec la coupe des matériaux composites où généralement cet effort est négligé et l'effort d'avance F_x est l'effort dominant. Ce comportement est expliqué par la différence de comportement mécanique selon les différentes directions de la structure usinée avec une bonne résistance des parois selon la direction verticale. Le tableau 2 résume ce comportement à travers les différents paramètres mécaniques.

Une première analyse de l'usinabilité des matériaux nids d'abeilles est réalisée par l'étude de l'influence des conditions de coupe sur les efforts de coupe (voir Figure 5). On observe une diminution des efforts avec l'augmentation de la vitesse de rotation de 10000 tr/min à 23000 tr/min. De plus, la figure 5 représente une comparaison entre les efforts de coupe mesurés expérimentalement et les efforts de coupe déterminés numériquement avec le model des éléments finis. Pour les efforts F_x et F_z , le model numérique est en accord avec les résultats expérimentaux

où la diminution des efforts avec l'augmentation de la vitesse de rotation est observée, par contre, pour l'effort de coupe F_y , un écart important est observé entre les efforts de coupe expérimentaux et numériques. Les efforts F_y numériques sont faibles et quasi constants avec une valeur approximative qui ne dépasse pas 1 N. Ce comportement est dû à la « technique de la suppression des éléments » associé au critère de Tsai-Wu dans le code Abaqus.

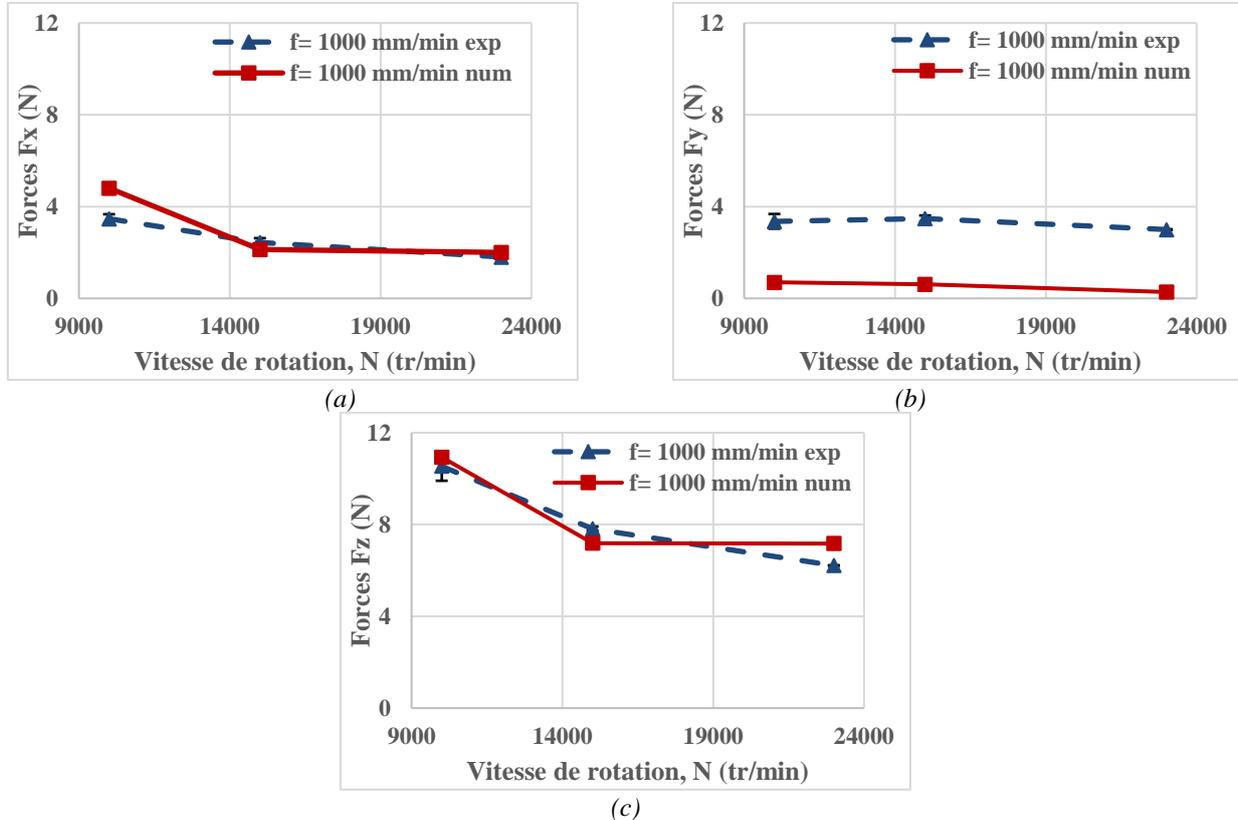


Fig. 5. Comparaison entre les efforts de coupe expérimentaux et numériques pour une vitesse d'avance de 1000 mm/min : (a) Evolution de l'effort d'avance F_x ; (b) Evolution de l'effort tangentiel F_y ; (c) Evolution de l'effort d'écrasement F_z .

2.4 Qualité des surfaces usinées

Compte tenu de leur faible niveau, les efforts de coupe seuls ne permettent pas de caractériser l'usinabilité des structures en nid d'abeilles Nomex®. La qualité des surfaces usinées permet d'établir un critère pour déterminer et quantifier les effets des conditions opératoires sur l'usinabilité des structures en nid d'abeilles Nomex®. Il est donc important d'étudier la nature des défauts introduits lors de l'usinage par fraisage, ainsi que l'importance de leur étendue.

Les défauts de qualité de surface, qui dépendent des conditions de coupe [21, 22] se manifestent par la délaminage, l'écaillage et la dégradation de la matrice pour les matériaux composites [23, 24]. Pour le matériau en nid d'abeilles Nomex®, on observe deux principaux défauts (Figure 6) ; des fibres d'aramide non coupées le long de la surface usinée et le déchirement des parois. L'apparence des fibres non coupées est un défaut d'usinage spécifique au matériau composite qui dépend du type de fibres et de leur orientation [25]. Le déchirement du papier Nomex®, est lié à l'apparence cellulaire de la structure en nid d'abeilles, qui se produit sous l'effet du chargement par cisaillement [26, 27].

Les fibres non coupées sont observées pour toutes les conditions de coupe (Figure 6-a, b et c). Mais elles sont moins importantes pour la vitesse de rotation 23000 tr/min. Cependant, pour la vitesse de rotation la plus faible (10000 tr/min), un déchirement des parois de nid d'abeilles est observé. La

faible vitesse de rotation de l'outil provoque le pliage des parois minces du Nomex® jusqu'au déchirement. Ces défauts influencent directement l'utilisation du nid d'abeille Nomex® dans les matériaux sandwich. Les défauts d'usinage provoquent une réduction de la résistance de liaison entre la peau et l'âme en nid d'abeilles, [28, 29].

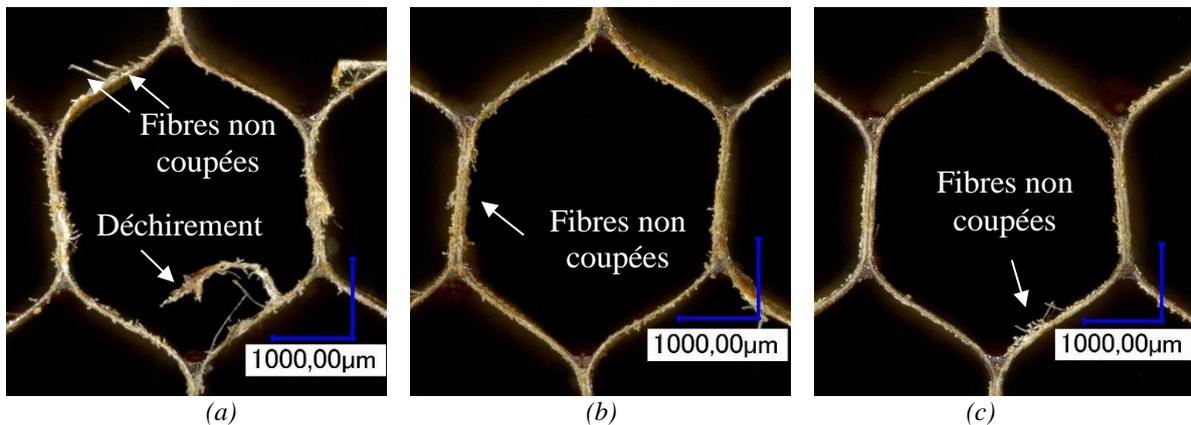


Fig.6. Surfaces d'usinage en nid d'abeilles Nomex®. (a) $f = 1000 \text{ mm/min}$, $N = 10000 \text{ tr/min}$; (b) $f = 1000 \text{ mm/min}$, $N = 15000 \text{ tr/min}$; (c) $f = 1000 \text{ mm/min}$, $N = 23000 \text{ tr/min}$.

4. Conclusion

Dans ce travail, la modélisation 3D de l'opération de fraisage a été réalisée sur des structures en nid d'abeilles Nomex®. Le modèle proposé prend en compte les interactions complexes entre la structure cellulaire de la pièce et les outils spécifiques utilisés pour l'usinage de ce type de matériaux. Le critère de rupture de Tsai-Wu a été utilisé. Des essais expérimentaux ont été effectués pour valider le modèle en comparant avec les résultats numériques. Les simulations montrent une évolution des efforts de coupe en bon accord avec les résultats expérimentaux sauf pour l'effort tangentiel. Ce comportement est dû à la suppression d'éléments avec le critère de rupture de Tsai-Wu dans le code EF Abaqus.

Néanmoins, cette modélisation permet d'analyser finement les interactions entre la structure en nid d'abeilles et l'outil de fraisage selon les conditions d'usinage. Cela permet d'optimiser les géométries de l'outil et la qualité de la surface usinée pour l'application de ces structures dans les matériaux sandwich.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier les membres des organisations suivantes :

- L'Agence Nationale de Recherche (ANR) pour avoir soutenu le projet labcom 'LARIOPAC': ANR-13-LAB2-0002 (www.lariopac.com).
- Le partenaire industriel 'Evatec-tools Group'

Références

- [1] D. GAY, Matériaux composites, Hermes, 2015.
- [2] H. Norville, C. Madera and E. Tibor, "Process for machining expanded honeycomb", U S Patent, N° 3,413,708, 1968.
- [3] A. Hirayama, "Methode for cutting honeycomb core", U S Patent, N° 6,740,268 B2, 2004.
- [4] P. Taylor, A. K. Pickett, A. J. Lamb, and F. Chaudoye, "Materials characterisation and crash modelling of composite-aluminium honeycomb sandwich material," no. February 2015, pp. 37–41, 2009.
- [5] C. C. Foo, G. B. Chai, and L. K. Seah, "A model to predict low-velocity impact response and damage in sandwich composites," Compos. Sci. Technol., vol. 68, pp. 1348–1356, 2008.
- [6] Á. J. Mancha, "Ingenierio industrial optimization of lightweight sandwich structures of commercial aircraft interior parts subjected to low-velocity impact," Universidad Pontificia Comillas MADRID, 2012.
- [7] I. Ivañez and M. M. Moure, "The oblique impact response of composite sandwich plates," Compos. Struct., vol. 133, pp. 1127–1136, 2015.

- [8] Z. Shengqing and C. G. Boay, “Damage and failure mode maps of composite sandwich panel subjected to quasi-static indentation and low velocity impact,” *Compos. Struct.*, vol. 101, pp. 204–214, 2013.
- [9] R. Roy, J. H. Kweon, and J. H. Choi, “Meso-scale finite element modeling of Nomex honeycomb cores,” *Adv. Compos. Mater.*, vol. 23, no. 1, pp. 17–29, 2014.
- [10] R. Seemann and D. Krause, “Numerical Modeling of Nomex Honeycomb Sandwich Cores at Meso-Scale Level,” *Compos. Struct.*, no. September, 2016.
- [11] R. Roy, S. Park, J. Kweon, and J. Choi, “Characterization of Nomex honeycomb core constituent material mechanical properties,” *Compos. Struct.*, vol. 117, pp. 255–266, 2014.
- [12] S. Heimbs, “Virtual testing of sandwich core structures using dynamic finite element simulations,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 45, no. 2, pp. 205–216, 2009.
- [13] S. Fischer, K. Drechsler, S. Kilchert, and A. Johnson, “Mechanical tests for foldcore base material properties,” *Compos. Part A*, vol. 40, no. 12, pp. 1941–1952, 2009.
- [14] R. Roy, K. H. Nguyen, Y. B. Park, J. H. Kweon, and J. H. Choi, “Testing and modeling of Nomex TM honeycomb sandwich Panels with bolt insert,” *Compos. Part B*, vol. 56, pp. 762–769, 2014.
- [15] S. V. Kilchert, “Nonlinear finite element modelling of degradation and failure in folded core composite sandwich structures,” Universität Stuttgart, 2013.
- [16] R. SEEMANN and D. KRAUSE, “Numerical modelling of nomex honeycomb cores for detailed analyses of sandwich panel joints,” 11th World Congr. Comput. Mech. WCCM.
- [17] C. T. Sun, B. J. Quinn, and J. Tao, “Comparative Evaluation of Failure Analysis Methods for Composite Laminates,” 1996.
- [18] G. M. Newaz and R. F. Gibson, *Proceedings of the eighth japan-us conference on composite materials*. CRC Press LLC, 1998.
- [19] L. Zhao, T. Qin, Y. Chen and J. Zhang, “Three-dimensional progressive damage models for cohesively bonded composite joint”, *Journal of Composite Materials*. vol. 48(6), pp. 707–721, 2014.
- [20] K. Gemkow, R. Vignjevic, “Strain-softening in continuum damage models: Investigation of MAT_058”, 9th European LS-DYNA Conference, 2013.
- [21] M. Haddad, R. Zitoune, F. Eyma, and B. Castanie, “Study of the surface defects and dust generated during trimming of CFRP : Influence of tool geometry , machining parameters and cutting speed range,” *Compos. PART A*, vol. 66, pp. 142–154, 2014.
- [22] J. P. Davim, P. Reis, and C. Conceic, “A study on milling of glass fiber reinforced plastics manufactured by hand-lay up using statistical analysis (ANOVA) ao Ant o,” vol. 64, pp. 493–500, 2004.
- [23] R. Zitoune, M. El Mansori, and V. Krishnaraj, “Tribo-functional design of double cone drill implications in tool wear during drilling of copper mesh/CFRP/woven ply,” *Wear*, vol. 302, no. 1–2, pp. 1560–1567, Apr. 2013.
- [24] S. Zenia, L. Ben Ayed, M. Nouari, and A. Delamézière, “An elastoplastic constitutive damage model to simulate the chip formation process and workpiece subsurface defects when machining CFRP composites,” *Procedia CIRP*, vol. 31, pp. 100–105, 2015.
- [25] X. M. Wang and L. C. Zhang, “An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics.pdf,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, pp. 1015–1022, 2003
- [26] Y. Aminanda, “Contribution à l’analyse et à la modélisation de structures sandwichs impactées,” L’ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE L’AÉRONAUTIQUE ET DE L’ESPACE, 2004.
- [27] L. Liu, H. Wang, and Z. Guan, “Experimental and numerical study on the mechanical response of Nomex honeycomb core under transverse loading,” *Compos. Struct.*, vol. 121, pp. 304–314, 2015.
- [28] J. Rion, Y. Leterrier, and J. E. Manson, “Prediction of the adhesive fillet size for skin to honeycomb core bonding in ultra-light sandwich structures,” *Compos. Part A*, vol. 39, pp. 1547–1555, 2008.
- [29] H. Tchoutouo and N. Gandy, “Adhesiveless Honeycomb Sandwich Structure With Carbon Graphite Prepreg for Primary Structural Application: a Comparative Study To the Use of Adhesive Film,” no. May, 2012.