



HAL
open science

Une approche optique pour déterminer le facteur de délaminage lors du perçage du CFRP.

Rayen Hanna, Frédéric Rossi, Gérard Poulachon, Raphaël Lorain, Maria Clara Henao Penaranda

► **To cite this version:**

Rayen Hanna, Frédéric Rossi, Gérard Poulachon, Raphaël Lorain, Maria Clara Henao Penaranda. Une approche optique pour déterminer le facteur de délaminage lors du perçage du CFRP.. Conference Manufacturing21, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay [ENS Paris Saclay], Oct 2022, Gif Sur Yvette, France. hal-04011655

HAL Id: hal-04011655

<https://hal.science/hal-04011655v1>

Submitted on 2 Mar 2023

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.



Une approche optique pour déterminer le facteur de délaminage lors du perçage du CFRP.

**Rayen HANNA^(a,b), Frédéric ROSSI^(a), Gérard POULACHON^(a),
Raphaël LORAIN^(b), Maria Clara HENAO PENARANDA^(b)**

*(a) Arts et Metiers Institute of Technology, LaBoMaP, Université Bourgogne
Franche-Comté, HESAM Université, F-71250 Cluny, France*

(b) TIVOLY, 50 rue de Molina, 42000 Saint-Etienne, France

Mail : rayen.hanna@ensam.eu

Résumé :

Dans le domaine aéronautique, la part des matériaux composites a rapidement augmenté ces dernières années pour représenter aujourd'hui une partie importante des produits réalisés. Dans ce contexte, le perçage de ces pièces s'avère être un verrou technologique pour l'industrie qui souhaite réduire les défauts pouvant pénaliser la résistance du matériau composite. Le délaminage est le phénomène d'endommagement dominant pendant le perçage du composite à fibre de carbone (CFRP). Dans cet article, de nouvelles approches pour le contrôle in-situ non-destructif du délaminage sont présentées. Des stratifiés de CFRP unidirectionnel du pré-imprégné T800/M21 ont été percés et la dimension du délaminage autour du trou a été mesurée par deux techniques : l'analyse d'image optique et la tomographie par rayons-X. La première méthode consiste en l'utilisation d'une caméra ultra-rapide SAZ pour filmer la sortie du foret et le battement du dernier pli ; cette méthode in-situ est accompagnée par un programme d'analyse d'images pour déterminer le facteur de délaminage (F_d) selon les niveaux de gris des pixels. Une seconde méthode utilisant la radiographie de la plaque se base sur la visualisation des fissures inter-plis pour déterminer l'intensité du délaminage. Les résultats des deux méthodes sont comparés afin de juger de l'efficacité de chacune d'elles à quantifier l'endommagement du matériau.

Mots clés : CFRP, perçage, délaminage, analyse d'images, tomographie.

1 Introduction

Les contraintes environnementales appliquées à l'industrie du transport et en particulier au secteur aéronautique imposent aux constructeurs une recherche permanente de réduction de la masse des avions. Cette recherche d'allègement des structures conduit les avionneurs à utiliser des quantités croissantes de matériaux à forte résistance spécifique tels que les matériaux composites à fibres de carbone pour la réalisation des aéronefs. Le polymère renforcé de fibres (PRF) est un matériau composite formé par la combinaison d'un renforcement en fibres et d'une matrice. Les renforts sont caractérisés par leur légèreté, leur rigidité et leur résistance, ce qui permet d'améliorer les propriétés mécaniques et tribologiques du matériau (Mondelin, 2010), tandis que la matrice polymère lie les fibres entre elles, assurant le transfert de charge et l'intégrité structurelle.

Avant l'assemblage des structures aéronautiques, plusieurs types d'usinage doivent être réalisés, en particulier le perçage des trous (des centaines de milliers environ) afin de riveter ou de boulonner les pièces entre elles. Or, le CFRP étant classé comme matériau difficile à usiner en raison de ses propriétés anisotropes, son perçage est accompagné de plusieurs défauts comme l'arrachement des fibres, la dégradation de la matrice et le délaminage (Rahme, 2015) qui peuvent diminuer la performance des structures à long terme (Figure 1). Il est retenu que le délaminage est le défaut le plus critique comme il est responsable de la plupart des non conformités pendant l'assemblage final. Ce défaut affecte non seulement la finition de surface et la tolérance d'assemblage, mais également la résistance de la pièce.

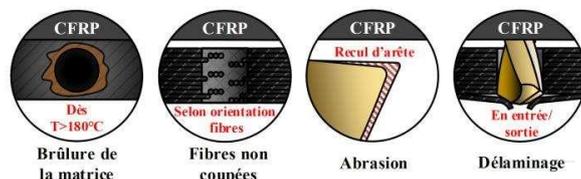


Figure 1 : Défauts générés dans la pièce de CFRP durant le perçage (Merzouki, 2018).

Cet article comparera deux méthodes non destructives pour mesurer le facteur de délaminage (voir paragraphe 2.1) : la mesure par caméra rapide et la mesure par tomographie. Le but de cette comparaison est de montrer que la méthode de mesure par caméra in-situ est sensible au délaminage (inter-plis) en sortie du composite. La simplicité et l'efficacité des analyses par caméra rapide permettra de suivre la progression du délaminage pendant la progression du foret.

2 Méthode de quantification du délaminage

2.1 Différents critères de mesure du délaminage.

La bibliographie montre que la quantification du délaminage a été abordée par de multiples méthodologies. Selon la dimension évaluée, les paramètres proposés pour la quantification de l'étendue du délaminage peuvent être classés en facteur de délaminage unidimensionnel, bidimensionnel ou même tridimensionnel (Geng, 2019). Le facteur de

délaminage conventionnel le plus utilisé ($F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}}$) a été proposé par (Chen, 1997) en raison de sa simplicité à être mis en œuvre en atelier. Il est défini comme le rapport entre le diamètre maximal de la zone de délaminage (D_{max}) et le diamètre nominal du trou (D_{nom}) ; les deux cercles doivent être concentriques, comme le montre la Figure 2. (Da Silva, 2013) propose un facteur unidimensionnel similaire ($F_{dmin} = \frac{D_{min}}{D_{nom}}$) où D_{min} est le diamètre minimal de la surface délaminée. Dans cette méthode, les deux cercles peuvent ne pas être concentriques.

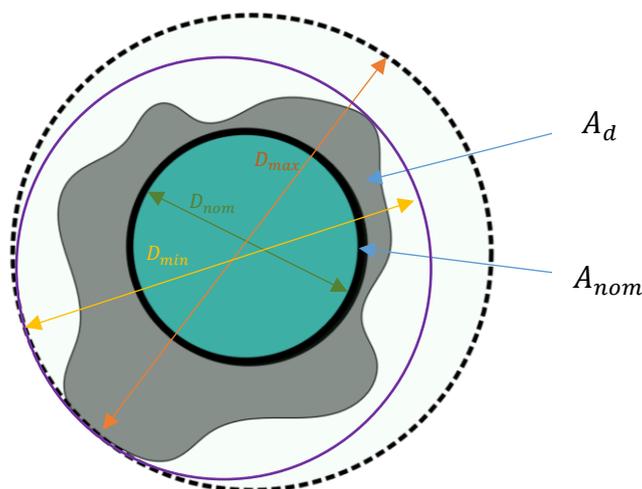


Figure 2 : Schéma des critères de délaminage.

D'autre part, (Faraz, 2009) a proposé un facteur de délaminage bidimensionnel (F_a). Il est défini comme le rapport entre la surface de délaminage (A_d) et la surface nominale du trou (A_{nom}) et est exprimé en pourcentage. Ce facteur de délaminage bidimensionnel semble être meilleur que le facteur conventionnel en raison de la prise en compte de la surface délaminée. Ce facteur bidimensionnel n'est pas le seul, il en existe d'autres développés par (Mohan, 2007), (Davim, 2007) et (Tsao, 2012).

Cependant, (Xu, 2018) reste le seul à avoir utilisé un facteur de délaminage tridimensionnel (F_v) :

$$F_v = \frac{V_d}{V_{nom}} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \frac{A_d^k}{A_{nom}} \quad (1)$$

Avec (p) le nombre total de plis délaminés, (k) le numéro du pli spécifique délaminé, (A_d) la surface délaminée et (A_{nom}) la surface du trou. Ce nouveau facteur de délaminage est défini comme le volume cumulé délaminé (V_d) par rapport au volume nominal du trou (V_{nom}), ceci permettant d'être indépendant de l'épaisseur du composite.

2.2 Différentes techniques de mesures

Afin d'obtenir une connaissance complète de la taille, de la forme et de l'emplacement du délaminage, la mesure non destructive (non destructive testing) est fortement souhaitée. Les technologies de mesure non destructive les plus utilisées dans la littérature sont le

microscope optique, la photographie numérique, la mesure ultrasonique, les rayons X, etc. et se basent généralement sur l'acquisition et le traitement d'images. La mesure visuelle à l'aide de microscopes optiques ou électroniques est une méthode de mesure pratique et économique adoptée par de nombreux chercheurs. La procédure de traitement de l'image impliquant l'amélioration de la qualité et l'analyse de l'image est généralement une étape clé pour limiter les écarts de mesure. Cependant, l'aspect sombre du composite pose des problèmes de détection des contours. D'autres chercheurs comme (Xu, 2018) et (Tsao & Hocheng, 2004) ont utilisé le contrôle par ultrasons pour détecter le délaminage.

Malgré son coût élevé et la taille limitée des échantillons, la détection par rayons X reste la méthode la plus adoptée pour un contrôle non destructif tridimensionnel des dommages causés par le délaminage des composites CFRP (Saoudi, 2016). Cependant, d'un point de vue scientifique, c'est toujours la méthode non destructive la plus précise disponible. (Haeger, 2016) par exemple, a utilisé la tomographie à rayons X comme méthode de référence pour évaluer les écarts entre une mesure optique et une mesure US type C-scan (Figure 3).

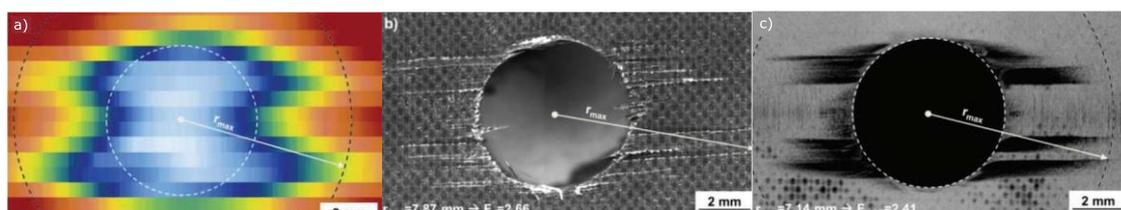


Figure 3 : Comparaison qualitative et quantitative du délaminage en sortie des trous percés dans le CFRP : a) contrôle par ultrasons (C-Scan), b) microscopie optique et c) tomographie par ordinateur (Haeger, 2016).

3 Montage expérimental

3.1 Paramètres de la campagne expérimentale

La campagne expérimentale d'observation in-situ des mécanismes de délaminage s'est déroulée sur une fraiseuse 5 axes GAMBIN. Le matériau usiné est une plaque de composite carbone multidirectionnelle de 10 mm d'épaisseur comportant 54 plis positionnés sous l'ordre suivant :

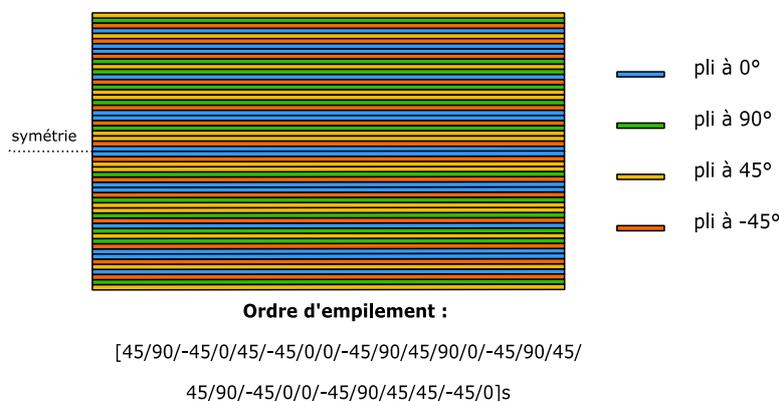


Figure 4 : Ordre d'empilement du stratifiés CFRP ;

L'outil de coupe utilisé est un foret prototype en carbure de tungstène \varnothing 9.5 mm. Les opérations de perçage sont faites sans lubrification. La vitesse de coupe V_c appliquée est de 55 m/min et l'avance par tour f de 0.5 mm/tr. Vingt trous ont été percés à la suite (Tableau 1) :

Tableau 1 : Tableau récapitulatif de la campagne expérimentale

Machine	Fraiseuse 5 axes GAMBIN
Matériau	CFRP multidirectionnel
Outil de coupe	Foret en carbure \varnothing 9.5 mm (TIVOLY)
Vitesse de coupe	55 m/min
Vitesse d'avance	0.5 mm/tr
Outil de mesure	Caméra rapide SA-Z
Profondeur de perçage	10 mm
Nombre de trous	20

3.2 Montage expérimentale

Pour observer les mécanismes de délaminage in-situ, un montage expérimental complexe (Figure 5) a été conçu et réalisé. L'utilisation de la fraiseuse 5 axes GAMBIN a permis de positionner la broche pour un perçage horizontal donnant plus de place pour les composants du montage.

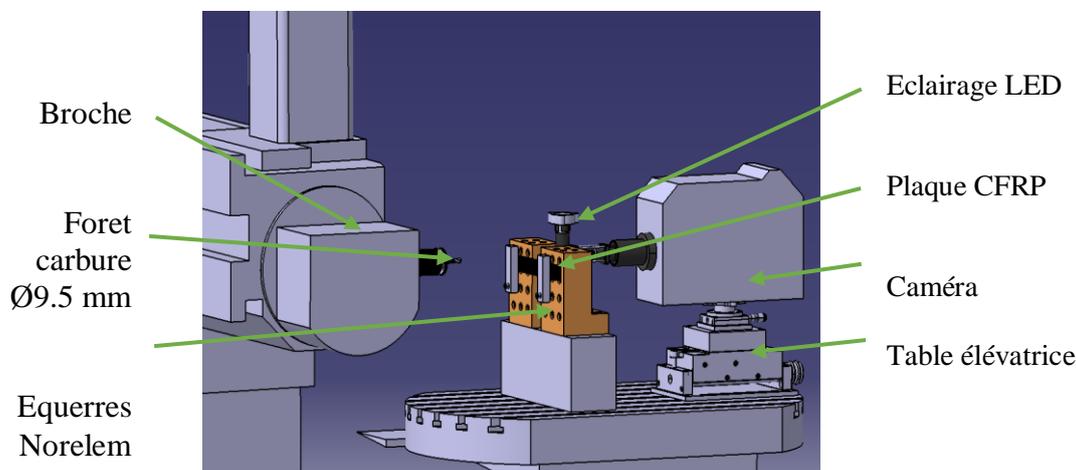


Figure 5 : CAO du montage expérimental.

La caméra rapide SAZ PHOTRON a été placée derrière la plaque, qui est maintenue entre deux équerres NORELEM, afin de visualiser la sortie du foret et le délaminage engendré. La caméra a été réglée à une distance focale de 50 mm par rapport à l'objectif. Toutefois, l'utilisation de la caméra rapide impose une forte puissance lumineuse pour éclairer la scène et avoir un film de bonne qualité. En effet, plus le nombre d'images par seconde est élevé, plus le temps d'obturation est faible et plus la puissance lumineuse nécessaire à l'acquisition vidéo est grande. Ainsi, un éclairage confocal a été effectué grâce à une

LED 22 W et un miroir semi-réfléchissant qui permet de rediriger la lumière dans l'objectif.

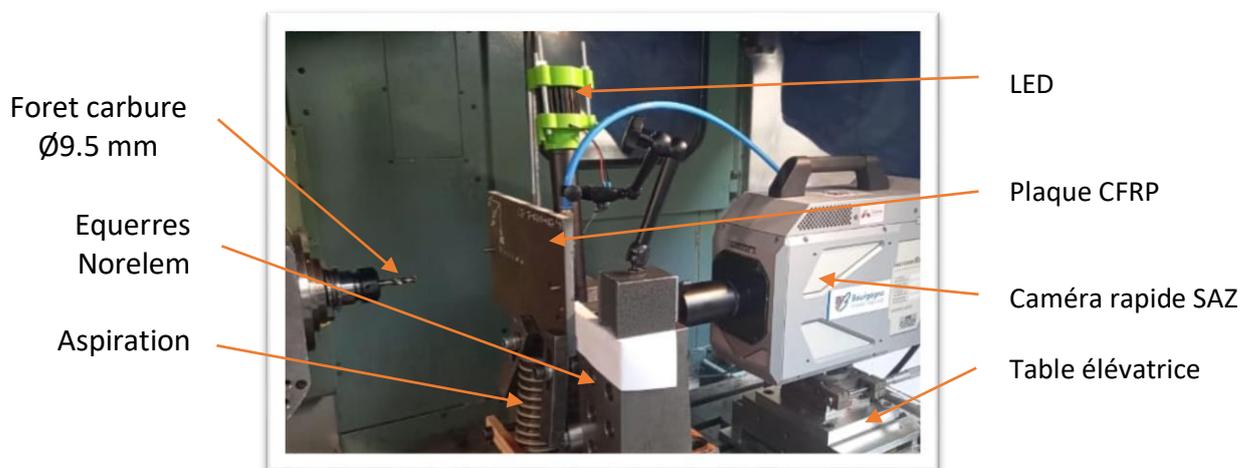


Figure 6 : Montage expérimental pour l'observation in situ des mécanismes de délaminage.

De plus, une feuille d'or, a été collée sur la surface arrière de la plaque afin de refléter la lumière coaxiale émise par la LED. Cela aide aussi à cacher la texture du CFRP qui perturbe l'analyse des images.

Les poussières de carbone produites lors de la coupe, sont soufflées par une buse d'air installée en face d'une aspiration. Cette configuration permet de protéger la caméra de toute pollution possible lors de la sortie du foret.

3.3 Principe de mesure par caméra rapide

Le principe de la mesure du délaminage par caméra rapide se base sur la réflexion des rayons lumineux après leur rencontre avec la surface arrière du dernier pli. Les rayons incidents de la LED étant confocaux à l'objectif, tout soulèvement de la surface du composite dévierait l'éclairage, se traduira par une zone noire sur notre image (Figure 7).

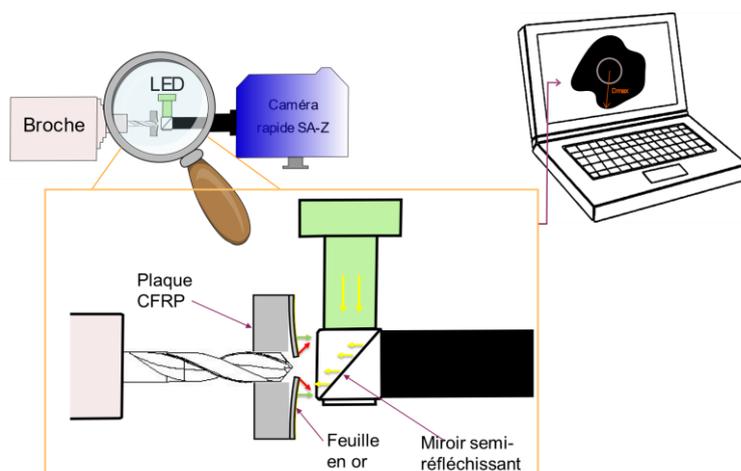


Figure 7 : Principe de détection de la zone de délaminage.

3.4 Détermination du facteur de délaminage par traitement d'image

Comme mentionné dans le paragraphe 2.1, le facteur de délaminage (F_d) est le rapport entre les deux diamètres des cercles D_{max} et D_{nom} . La caméra a été réglée pour que le centre du trou soit confondu avec le centre de l'image. D_{max} correspond à deux fois la distance entre le pixel le plus loin appartenant à la zone de délaminage et le centre, alors que D_{nom} sera fixé à 9.5 mm (le diamètre du foret).

L'image caractéristique du délaminage d'un perçage est choisie comme celle où le délaminage est le plus prononcé dans le sens majoritaire de propagation des fissures. Par la suite, l'image est traitée par un algorithme qui appliquera les fonctions détaillées sur la Figure 8 : un flou médian donne à chaque matrice de 6x6 pixels le niveau de gris médian de ces derniers (Figure 7b), une inversion de couleur (Figure 7c) et un seuillage pour transformer l'image en binaire (Figure 7e). Enfin, les bords de la zone délaminée sont détectés par un algorithme de détection de contour utilisant la méthode de (Sobel, 1982) (Figure 7e). La dernière étape consiste à trouver la plus grande distance entre les pixels de ce bord créé et le centre du trou qui représentera le rayon du cercle de délaminage. Ainsi, dans la figure 7f, le cercle en vert représente le délaminage maximal, le cercle jaune représente le contour du trou alors que le contour bleu désigne la frontière de la zone délaminée.

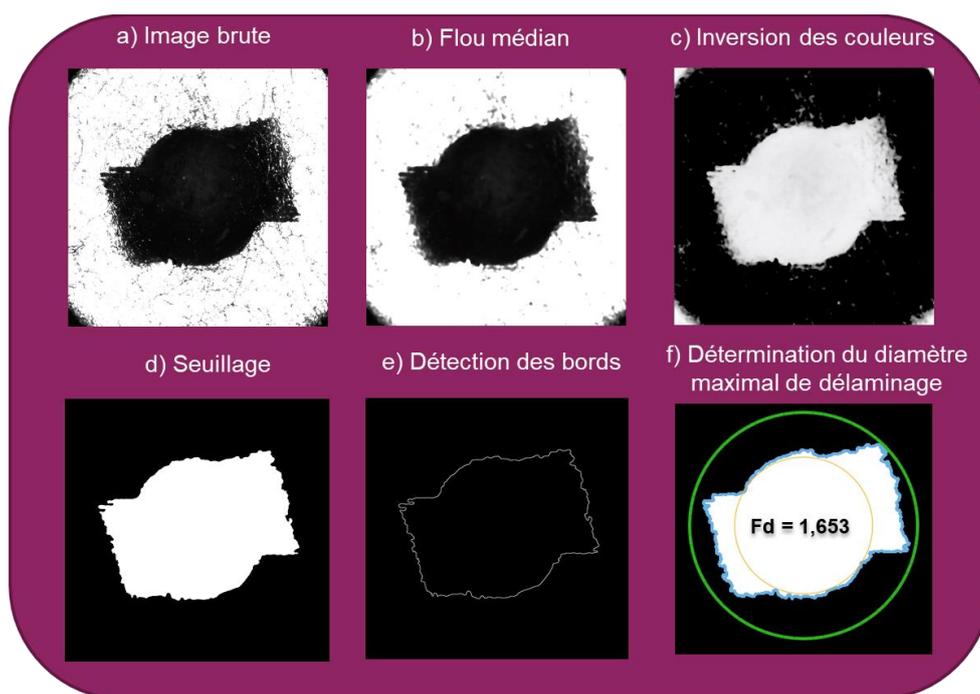


Figure 8 : Méthodologie de détermination du facteur de délaminage.

3.5 Mesure des fissures inter-plis par tomographie

Afin de valider cette méthode de mesure par caméra rapide, quatre trous ont été sélectionnés pour être mesurés par tomographie afin de recueillir des informations 3D de l'endommagement. Un tomographe de type « North Star Imaging X5000 » équipé d'un tube micro foyer a été utilisé. Jusqu'à 1620 radiographies ont été prises pendant que le spécimen tournait de 360° autour de son axe. Pour réaliser la comparaison entre deux approches, le même facteur de délaminage (F_d) ayant la même définition

unidimensionnelle a été utilisé dans les deux cas. Des images de coupe ont été extraites du volume 3D dans le logiciel MyVGL3.5 comme le montre la Figure 9. Cette image correspond aux interfaces entre les deux derniers plis qui sont le plus affectés par le délaminage.

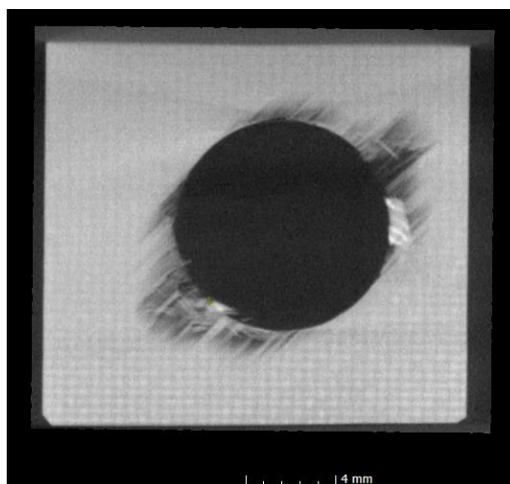


Figure 9 : Image de coupe obtenue par tomographie à l'interface entre les deux derniers plis pour le trou 2.

4 Résultats et comparaison

Comme le montre la Figure 10, une comparaison quantitative des deux méthodes a été effectuée pour le délaminage en sortie en utilisant le facteur de délaminage expliqué dans le paragraphe 3.4 (Voir Figure 10). La tomographie assistée par ordinateur a été choisie comme méthode de référence dans cette étude, car les images de superposition de la tomographie contiennent toutes les informations sur le délaminage en profondeur.

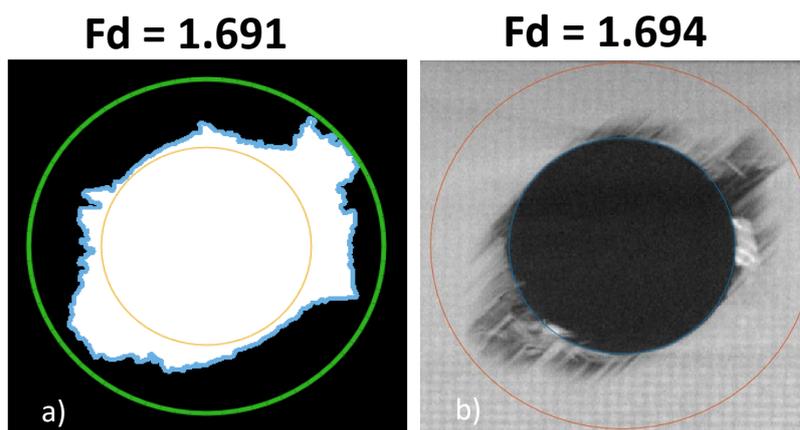


Figure 10 : Facteurs de délaminage pour le premier trou mesuré déduit à partir des deux méthodes : a) optique b) par tomographie.

Par conséquent, les facteurs de délaminage déterminés à partir des images par caméra sont directement comparés aux facteurs de délaminage basés sur les images extraites de la tomographie comme le montre la Figure 11. Le diagramme montre que les deux méthodes sont quantitativement en bon accord. Cela est déduit de l'erreur relative

moyenne égale à 0.95 % montrant une bonne corrélation (de 99%) entre la variable de réponse et la variable prédictive.

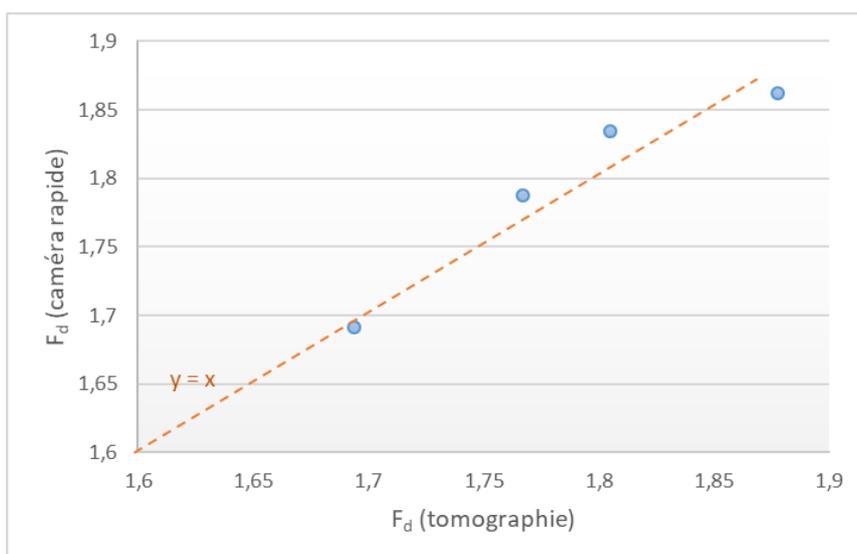


Figure 11 – Comparaison du facteur de délaminage des trous percés dans le CFRP déterminé par la méthode optique et par la tomographie.

Tous ces résultats concluent que la méthode de mesure du délaminage par caméra rapide est une méthode in-situ efficace pour l'analyse des défauts superficiels interplis en sortie de perçage.

Conclusion

Le but de ces travaux est d'aller vers des méthodes in-situ pour améliorer le contrôle de la production en usinage. Pour cela, des trous de diamètre 9.5 mm ont été percés dans du composite carbone et deux méthodes de mesure par caméra rapide suivi d'un traitement d'image et par tomographie ont été comparées pour détecter le défaut de délaminage en sortie.

La méthode consiste à détecter le déplacement hors-plan de la surface arrière de la plaque percée à l'aide d'une caméra rapide qui reflète le changement d'orientation des derniers plis.

Les méthodes de mesure non-destructives par caméra rapide et par tomographie sont qualitativement en bon accord sur la valeur du facteur du délaminage, ce qui permet de valider la méthode proposée.

Remerciements

Les auteurs remercient M. Bertrand Marcon (ingénieur de recherche au LaBoMaP) pour sa précieuse contribution à ce travail.

Références

Chen WC. « Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. » *Int J Mach Tools Manuf* (1997);37(8):1097–108.

Da Silva DNR. « Image processing methodology for assessment of drilling induced damage in CFRP » *Universidade Nova de Lisboa*; (2013).

Davim J, Rubio J, Abrao A. « A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. » *Compos Sci Technol* (2007);67:1939–45.

Faraz A, Biermann D, Weinert K. « Cutting edge rounding: an innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates ». *Int J Mach Tools Manuf* (2009);49:1185–96.

Geng D., Yihang L., Zhenyu S., Zhenghui L., Jun C., Xun L., Xinggang J., et Deyuan Z. « Delamination Formation, Evaluation and Suppression during Drilling of Composite Laminates: A Review ». *Composite Structures* 216 (2019): 168–86.

Haeger A, Schoen G, Lissek F, Meinhard D, Kaufeld M, Schneider G, et al. « Non destructive detection of drilling-induced delamination in CFRP and its effect on mechanical properties. » *Procedia Eng* (2016);149:130–42.

Merzouki J., « Etude des chargements thermomécaniques induits par le resserrement du trou en perçage du Ti6Al4V sous assistance cryogénique, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers » - ENSAM, (2018)

Mohan NS, Kulkarni SM, Ramachandra A. « Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials. » *J Mater Process Tech* (2007);186:265–71.

Mondelin A., Furet B., Rech J. « Characterisation of friction properties between a laminated carbon fibres reinforced polymer and a monocrystalline diamond under dry or lubricated conditions. » *Tribology International* Volume 43, Issue 9, (2010), Pages 1665-1673

Rahme P., Landon Y., Lachaud F., Piquet R., Lagarrigue P. « Delamination-free drilling of thick composite materials » *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Volume 72, (2015), Pages 148-159.

Saoudi J., Zitoune R., Mezlini S., Gururaja S., Seitier P. « Critical thrust force predictions during drilling: Analytical modeling and X-ray tomography quantification. » *Composite Structures* Volume 153, (2016), Pages 886-894.

Sobel M. « Asymptotic Confidence Intervals for Indirect Effects in Structural Equation Models. » *Sociological Methodology*. (1982) 13: 290–312.

Tsao CC, Hocheng H. « Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. » *Int J Mach Tools Manuf* (2004);44:1085–90.

Tsao CC, Kuo KL, Hsu IC. « Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core-saw drill ». *Int J Adv Manuf Technol* (2012);59:617–22.

Xu J, Li C, Mi S, An Q, Chen M. « Study of drilling-induced defects for CFRP composites using new criteria. » *Compos Struct* (2018);201:1076–87.