



HAL
open science

Méthode d'essai rapide pour la croissance de la fissure de fatigue en mode II des joints adhésifs en CFRP

Yuan Wu, Pascal Casari, Silvio De Barros, Adiana Silva

► **To cite this version:**

Yuan Wu, Pascal Casari, Silvio De Barros, Adiana Silva. Méthode d'essai rapide pour la croissance de la fissure de fatigue en mode II des joints adhésifs en CFRP. JST Endommagement et rupture des structures composites, AMAC, Apr 2024, Toulouse, France. hal-04718359

HAL Id: hal-04718359

<https://hal.science/hal-04718359v1>

Submitted on 2 Oct 2024

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.

Méthode d'essai rapide pour la croissance de la fissure de fatigue en mode II des joints adhésifs en CFRP

A fast testing method for mode-II fatigue crack growth of CFRP adhesive joints

Yuan Wu¹, Pascal Casari¹, Silvio De Barros² et Adiana Silva³

1 : IUT de Saint-Nazaire, CNRS, GeM, UMR 6183
Nantes Université, Ecole Centrale Nantes
58 rue Michel Ange, F-44600 Saint-Nazaire, France
e-mail : yuan.wu@univ-nantes.fr et pascal.casari@univ-nantes.fr

2 : Campus CESI Saint-Nazaire
24, Le Paquebot - CS 60133, 44603 Saint-Nazaire, France
e-mail : sdebarros@cesi.fr

3 : Département d'ingénierie
Université Fédéral Rural de Semi-Aride
Avenue Université "Leto Fernandes", Site Esperança II, Zone Rural, 59.780-000 Caraubas/RN, Brésil
e-mail : adiana@ufersa.edu.br

Résumé

Pour contribuer au progrès du protocole d'essai de mode II et de fatigue pour les stratifiés composites, une méthode d'essai rapide pour la croissance de la fissure de fatigue en mode II des joints adhésifs en CFRP a été mise au point avec une fréquence élevée de 5 Hz. La nouvelle technique d'impression 3D a été utilisée pour produire les charges et les supports du dispositif d'essai de flexion en 3 points. Selon la méthode de calcul de la conformité, la propagation de la longueur de la fissure de fatigue en mode II et la dégradation de la rigidité des stratifiés en CFRP ont été mesurées à certains cycles jusqu'à un cycle élevé de 10^6 . Enfin, la vitesse de croissance de la fissure et la durée de vie en fatigue peuvent être prédits sur la base de ces observations. Il a été constaté que la croissance de la fissure de fatigue en mode II était plus rapide après $5 \cdot 10^4$ cycles.

Abstract

To contribute to the progress of the mode II and fatigue test protocol for composite laminates, a fast testing method for mode-II fatigue crack growth of CFRP adhesive joints was developed with a high frequency of 5 Hz. And the new 3D printing technique was employed to produce the loads and supports for the 3-point bending test fixture. According to the compliance calculation method, the mode-II fatigue crack length propagation and stiffness degradation of CFRP laminates were measured at certain cycles until a high-cycle of 10^6 . Finally, the crack growth rate and fatigue life can be predicted based on these observations. It was found that the fatigue crack growth was faster after $5 \cdot 10^4$ cycles.

Mots Clés : fatigue en mode II, croissance de la fissure, conformité, dégradation de la rigidité en fatigue, impression 3D
Keywords : mode-II fatigue, crack growth, compliance, fatigue stiffness degradation, 3D printing

1. Introduction

Les composites à base de polymères renforcés de fibres de carbone (CFRP) ont été largement utilisés dans les secteurs de l'aérospatiale et de l'aéronautique, en raison de leur résistance et de leur rigidité spécifiques plus élevées. Cependant, la qualité des joints adhésifs constitue un défi majeur pour la sécurité des stratifiés en CFRP. Bien que la méthode d'essai de délamination en mode I pour les composites, basée sur l'essai à double cantilever beam (DCB) [1], ait beaucoup progressé, il y a eu beaucoup d'inconnues concernant l'essai de rupture en mode II (ENF). La propagation de la fissure en mode II est plus compliquée et instable [2], et elle peut être affectée par de nombreux facteurs tels que le nombre de plis, l'épaisseur du composite, la longueur initiale de la fissure, etc. En outre, les essais de fatigue [3] sur les composites constituent un autre obstacle majeur pour les chercheurs, car ils prennent du temps et sont difficiles à contrôler. Il devient de plus en plus

complexe, en particulier lorsque la rupture en mode II et la performance en fatigue sont prises en compte ensemble.

Par conséquent, dans ce travail, une méthode d'essai rapide pour la croissance de la fissure de fatigue en mode II des joints adhésifs en CFRP a été développée avec une fréquence cyclique de 5 Hz, basée sur la norme ASTM 7905/7905M-19 [4]. La nouvelle technique d'impression 3D a également été utilisée pour produire les charges et les supports du dispositif d'essai de flexion en 3 points. Enfin, la propagation de la longueur de la fissure de fatigue en mode II et la dégradation de la rigidité ont été mesurées jusqu'à un cycle élevé de 10^6 . La vitesse de croissance de la fissure et la durée de vie en fatigue peuvent être prédits sur la base de ces observations.

2. Méthodes expérimentales

Pour tester la croissance de la fissure de fatigue en mode II, les cinq échantillons CFRP ont été fabriqués conformément à la norme ASTM 7905/7905M-19 [4]. L'appareil doit suivre la configuration indiquée dans la Fig. 1. Les dimensions indiquées dans cette figure sont les suivantes: r_1 : 4,7 – 9,6 mm (valeur préférentielle 8 mm); r_2 : 3 – 6,4 (valeur préférentielle 5 mm); a_0 : 35 mm; L : 50 mm; L_c : ≥ 15 mm; L_u : ≥ 30 mm. Plus important encore, a_0 est la longueur initiale de la fissure entre la pointe de la fissure et le rouleau d'appui.

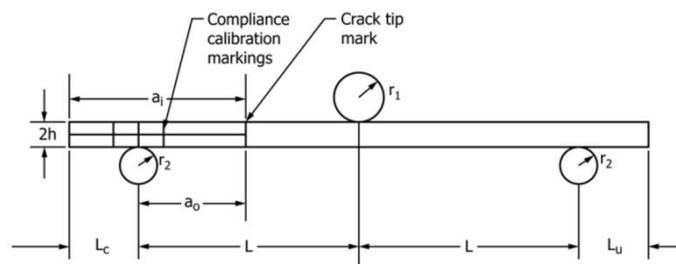


Fig. 1. Configuration de l'échantillon et du montage.

Sur la base de la conception de l'appareil dans la Fig. 1, nous avons mis au point un système électrique (voir Fig. 2 et Fig. 3) pour tester rapidement les cycles de fatigue et la durée de vie en fatigue de l'échantillon avec pré-fissure. Le système est ensemble de un verin électrique, un capteur de force, un pupitre de commande, le charge d'impression 3D et les supports d'impression 3D. Le pupitre intègre l'armoire électrique, le PC de commande (voir Fig. 3), et le matériel de contrôle des moteurs. Une charge sinusoïdale à déplacement contrôlé a été appliquée avec un rapport de déplacement $R=0,4$. Le déplacement maximal est donc ici de 1,2 mm. La fréquence de chargement était fixée à 5 Hz pour des essais plus rapides.

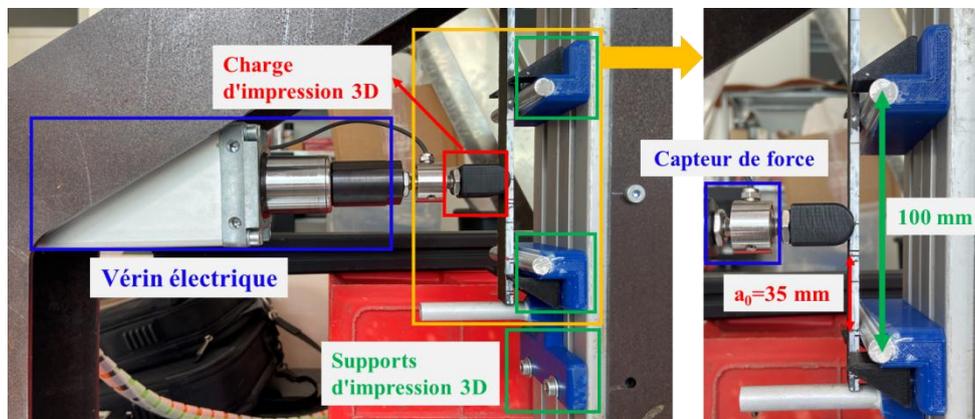


Fig. 2. Système électrique pour tester la croissance de la fissure de fatigue en mode II.

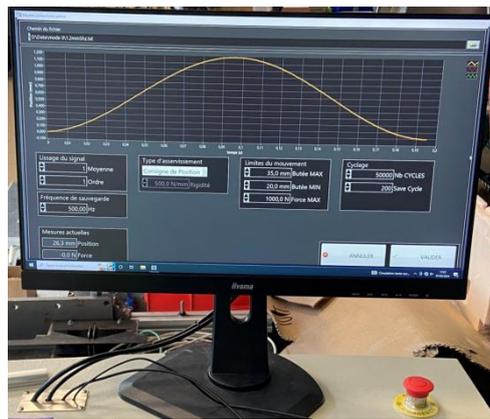


Fig. 3. PC de commande montrant le contrôle du déplacement et la fréquence.

Pendant l'essai de fatigue, la longueur de la fissure $a_{vis,j}$ et la rigidité de l'échantillon ont été enregistrées aux cycles d'intervalle (cycles 5, 10, 10^2 , $5 \cdot 10^2$, 10^3 , $5 \cdot 10^3$, 10^4 , $2 \cdot 10^4$, $5 \cdot 10^4$, 10^5 , $2 \cdot 10^5$, $5 \cdot 10^5$ and 10^6). L'indice "j" se réfère à la $j^{ème}$ acquisition, et "vis" au fait qu'il s'agit de la longueur visuelle de la fissure. Il existe donc une correspondance entre la $j^{ème}$ acquisition de la fissure et le cycle correspondant. Pour chaque acquisition du $j^{ème}$ cycle, la pente de la courbe P (force) vs δ (déplacement) peut être obtenue (voir Fig. 4). La conformité C peut alors être obtenue. Eq. 1 peut être utilisée pour obtenir les paramètres m_{vis} et A_{vis} . Enfin, la croissance de la fissure de fatigue en mode II du stratifié en CFRP peut être prédite en fonction de ces deux paramètres.

$$C = m_{vis}a^3 + A_{vis} \quad (\text{Eq. 1})$$

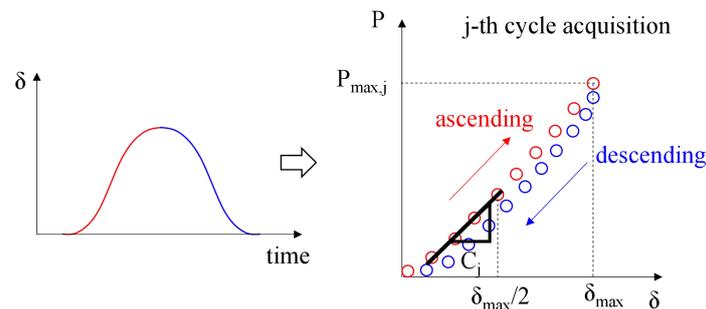


Fig. 4. Calcul de la conformité en fonction de l'acquisition du $j^{ème}$ cycle.

3. Résultats et discussions

La longueur de la fissure mesurée et la conformité au $j^{ème}$ cycle ont été affichées dans le Tab. 1. Ensuite, la courbe linéaire dans la figure 5 peut être tracée selon Eq. 1. De cette manière, les deux paramètres peuvent être obtenus comme suit : $m_{vis} = 4.253 \cdot 10^{-8}$, $A_{vis} = 1.60 \cdot 10^{-8}$. La croissance de la fissure de fatigue en mode II était plus rapide après $5 \cdot 10^4$ cycles. Comme le montre dans la Fig. 6, la dégradation de la rigidité en fatigue normalisée a été tracée. La rigidité diminue plus rapidement avant $5 \cdot 10^4$ cycles, avec une diminution proche de 14 %. Après $5 \cdot 10^4$ cycles, la dégradation de la rigidité devient plus lent. Et après $2 \cdot 10^5$ cycles, la dégradation de la rigidité devient presque stable. La diminution finale de la rigidité est inférieure à 37 %. Cela signifie que la fissuration microscopique de la matrice [3] est dominante avant $5 \cdot 10^4$ cycles, tandis que la délamination se propage beaucoup plus après $5 \cdot 10^4$ cycles.

Cycles	5	10	10^2	$5 \cdot 10^2$	10^3	$5 \cdot 10^3$	10^4
$a_{vis,j}$ (mm)	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.20	35.80
C_j	0.0033	0.0033	0.00334	0.0033	0.0033	0.0034	0.0034

Cycles	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	10^5	$2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	10^6	
$a_{vis,j}$ (mm)	36.00	36.00	40.00	40.00	40.00	46.00	
C_j	0.0035	0.0038	0.0043	0.0049	0.005	0.0052	

Tab. 1. La longueur de la fissure et la conformité au $j^{\text{ème}}$ cycle.

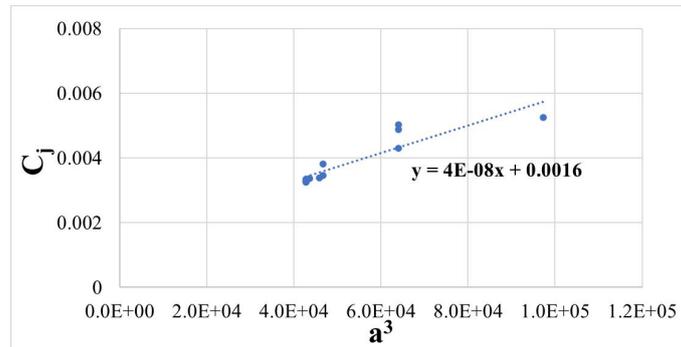


Fig. 5. Calcul de la conformité en fonction de la longueur de la fissure.

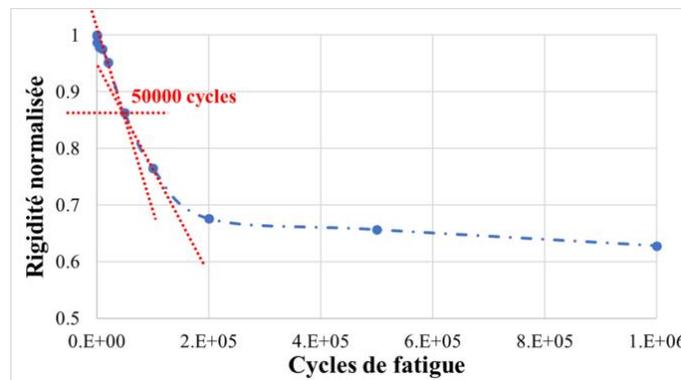


Fig. 6. Dégradation de la rigidité en fatigue normalisée.

4. Conclusions

Par une méthode d'essai plus rapide, la propagation de la fissure de fatigue en mode II et la dégradation de la rigidité des stratifiés en CFRP ont été mesurées à certains cycles jusqu'à un cycle élevé de 10^6 . C'est intéressant de découvrir que la vitesse de croissance de la fissure était plus rapide après $5 \cdot 10^4$ cycles, après quoi la dégradation de la rigidité devient plus lente. Mais d'autres tests doivent être répétés pour vérifier la répétabilité et la stabilité des tests de fatigue en mode II.

Remerciements

Nous remercions COST Action CertBond d'avoir fourni tous les échantillons CFRP et le protocole.

Références

- [1] B. R. K. Blackman, A. J. Brunner, J. G. Williams « Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem », *Engineering fracture mechanics* Vol. 73 n° 16, pp. 2443-2455, 2006.
- [2] J. J. M. Machado, E. A. S. Marques, R. D. S. G. Campilho, L. F. M. da Silva « Mode II fracture toughness of CFRP as a function of temperature and strain rate », *Composites Part B: Engineering* Vol. 114, pp. 311-318, 2017.
- [3] T. Peng, Y. Liu, A. Saxena, S. Abhinav, K. Goebel « In-situ fatigue life prognosis for composite laminates based on stiffness degradation », *Composite Structures* Vol. 132, pp. 155-165, 2015.
- [4] ASTM 7905/7905M-19, Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, 2019.