

Évaluation combinée de la ténacité et de la performance de réparation dans les stratifiés unidirectionnels CF/PPS sous chargement statique et cyclique.

Combined Assessment of Toughness and Repair Performance in Unidirectional CF/PPS Laminates Under Static and Fatigue Loading

M. Conan¹, M. Arhant², T. Bonnemains³, E. Lolive³, N. Carrere¹

1 : ENSTA Bretagne, UMR CNRS 6027, IRDL
2 rue François Verny, F-29200 Brest
mathilde.conan@ensta-bretagne.org et nicolas.carrere@ensta-bretagne.org

2 : Ifremer, Laboratoire Structures et Matériaux Avancés
1625 route de Sainte-Anne, F-29280 Plouzané
mael.arhant@ifremer.fr

3 : Université de Bretagne Occidentale, UMR CNRS 6027, IRDL
Rue de Kergoat - CS 93837, F-29200 Brest
thomas.bonnemains@univ-brest.fr et eric.lolive@univ-brest.fr

Résumé

Les matrices thermoplastiques, souvent plus tenaces que celles des thermodurcissables, assurent une meilleure absorption de l'énergie lors de l'impact et limitent la propagation des fissures. Afin de quantifier cette ténacité, l'essai de délaminage en mode I (DCB) est utilisé pour déterminer le taux de libération d'énergie critique GI_c , essentiel pour évaluer la résistance des interfaces. Toutefois, la propagation des fissures sous fatigue reste un phénomène complexe et difficile à modéliser. Cette étude propose une méthode permettant de maintenir des taux constants de libération d'énergie cyclique ΔG , ce qui permet de réduire la durée des essais tout en offrant des résultats fiables. Cette approche repose sur l'automatisation du calcul de la longueur de fissure à l'aide de la théorie des poutres. En outre, les éprouvettes endommagées seront réparées par un cycle thermique similaire à celui utilisé lors de leur fabrication initiale et sollicitées une nouvelle fois afin d'évaluer l'efficacité de la réparation. L'objectif principal de cette étude est d'analyser simultanément la ténacité et la capacité de réparation de composites thermoplastiques en PPS et fibres de carbone continues, pour mieux comprendre leur performance dans des conditions d'utilisation réelles.

Abstract

Thermoplastic matrices, which are often tougher than thermoset matrices, provide better energy absorption during impact and limit crack propagation. To quantify this toughness, the Mode I delamination (DCB) test is used to determine the critical energy release rate GI_c , a key parameter for assessing the strength of interfaces. However, crack propagation under fatigue remains a complex and difficult phenomenon to model. This study proposes a method to maintain constant cyclic energy release rates ΔG , which reduces test duration while providing reliable results. The approach is based on the automation of crack length calculations using beam theory. In addition, damaged specimens are repaired using a thermal cycle similar to that used during initial manufacture and reloaded to assess the effectiveness of the repair. The primary objective of this study is to simultaneously evaluate the toughness and repair capabilities of thermoplastic composites made from PPS and continuous carbon fibres, providing a deeper understanding of their performance under real world conditions.

Mots Clés : thermoplastique, mode I, ténacité, taux de libération d'énergie, réparation

Keywords: thermoplastic, mode I, Fatigue crack growth, interlaminar fracture toughness, repaired

1. Introduction

L'utilisation des composites thermoplastiques est une solution permettant de répondre aux besoins croissants en matière d'efficacité énergétique et de durabilité dans différents secteurs industriels. Leur ténacité, souvent supérieure à celle des thermodurcissables, leur permet d'absorber une plus grande quantité d'énergie lors d'un impact et de résister davantage à la propagation des fissures.

Pour évaluer la ténacité des composites thermoplastiques, l'essai de DCB (Double Cantilever Beam) qui évalue le délaminage en mode I, s'impose comme une méthode de référence [1-3]. Cet essai consiste à ouvrir progressivement une fissure préexistante pour la faire propager entre deux plis du stratifié. Sous un chargement quasi-statique, piloté en déplacement, il est possible de caractériser le taux de restitution d'énergie critique GI_c , une donnée essentielle pour quantifier la résistance des interfaces. La propagation sous chargement cyclique d'un délaminage pré-existant due à des chargements accidentels est également une donnée importante en termes de dimensionnement et de tenue au dommage.

Un des principaux avantages des matériaux composites à matrice thermoplastique réside dans leur capacité à être réparés par chauffage, notamment après des événements ayant provoqué des fissurations matricielles et des délaminages. Cette étude qui s'inscrit dans le cadre d'une thèse vise à explorer la possibilité de les réparer à l'aide d'un cycle thermique similaire à celui utilisé lors de leur fabrication initiale, suivi d'une nouvelle sollicitation mécanique destinée à évaluer l'efficacité de la cicatrisation de la matrice.

Dans cet article, nous nous intéresserons à la tenue au délaminage sous sollicitation statique et cyclique qui nous semble être des indicateurs intéressants pour caractériser la nocivité d'un dommage ainsi que la qualité d'une réparation. Dans une première partie nous présenterons le matériau de l'étude ainsi que les approches expérimentales pour caractériser la tenue au délaminage en statique et en fatigue. Dans cette étude, nous exploitons une méthode qui permet de maintenir le taux de restitution d'énergie cyclique ΔG constant durant l'essai, réduisant ainsi considérablement la durée des essais. Dans une seconde partie nous présenterons les résultats obtenus. Enfin, la dernière partie est consacrée aux aspects non traités dans ce résumé et qui seront abordés lors de la présentation.

2. Matériaux et méthodes

2.1 Matériaux

Le matériau utilisé est un pré-impregné unidirectionnel renforcé de fibres de carbone continues et de polysulfure de phénylène (Carbone/PPS), produit par Teijin (Tenax™ TPUD HT). Il présente une fraction volumique de fibres de 66 % et une épaisseur de pli de 140 μm . La matrice PPS est un polymère semi-cristallin dont la température de transition vitreuse est de 90 °C et la température de fusion de 280 °C. Le module de flexion, tel que rapporté dans la fiche technique du produit, est de 115 GPa.

2.2 Process de fabrication

Des panneaux de stratifié avec une séquence d'empilement $[0]_{30}$ sont fabriqués à l'aide d'une presse à plateaux chauffants (DK Technologies). Le composite est déposé dans un moule en acier sur mesure pour produire des plaques de 310 \times 310 mm². Le cycle de cuisson (Figure 1) a été choisi afin d'obtenir un taux de cristallinité maximum tout en minimisant les défauts induits lors de la phase de fabrication (ondulation des fibres et porosités).

La particularité des éprouvettes d'essai de DCB est d'intégrer une pré-fissure lors de la fabrication, grâce à l'ajout d'un insert de Polyimide (Diatex, modèle 25 μm) placé dans le plan médian du stratifié (Figure 2). Afin de garantir une qualité optimale et de faciliter la réparation, les éprouvettes sont découpées au jet d'eau, offrant une grande précision de répétabilité. Elles mesurent 250 \times 20 mm² avec une pré-fissure de 60 mm.

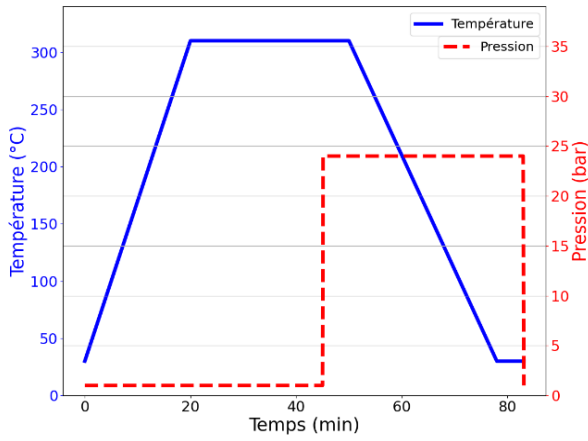


Figure 1: Cycle de chauffe du Carbone/PPS

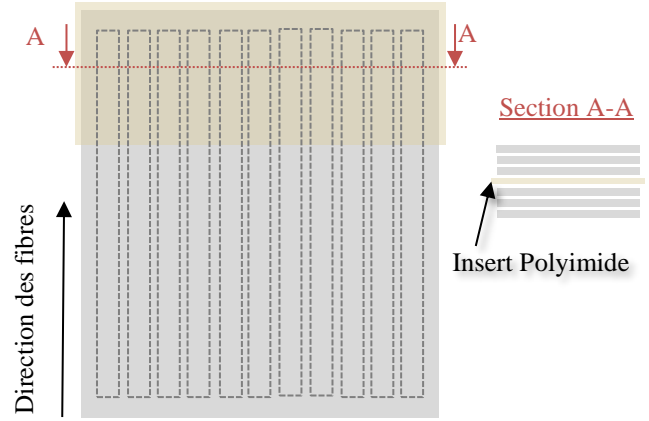


Figure 2: Empilement du stratifié pour les éprouvettes DCB

2.3 Essais de DCB

Le taux de restitution d'énergie critique d'une interface de délaminage en mode I est évalué à l'aide d'un essai DCB (Double Cantilever Beam). Conforme à la norme ASTM D5528, cet essai consiste à induire la propagation d'une fissure artificielle en exerçant une traction sur les deux bras d'une éprouvette (voir Figure 3). La progression de l'essai est suivie par une acquisition d'images à une fréquence de 1 Hz, permettant de mesurer l'avancée de la fissure à l'aide de graduations le long des bras, et de quantifier l'ouverture angulaire à l'aide de marqueurs dédiés. Des talons en aluminium de $20 \times 20 \times 10 \text{ mm}^3$ sont collés par un adhésif Loctite 406 après un traitement de surface Loctite 770.

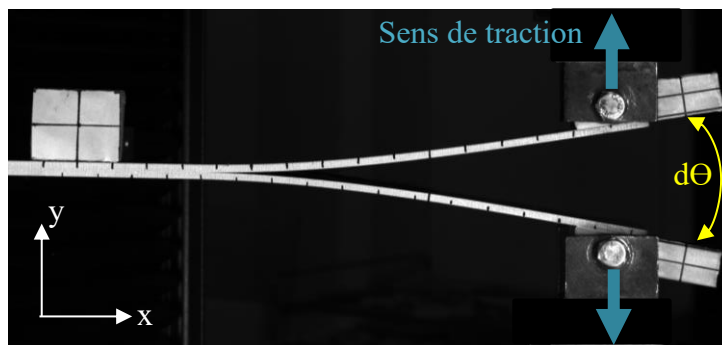


Figure 3: Suivi image de l'essai de DCB

D'une part, les essais en chargement monotone sont réalisés sur une machine d'essai Instron 5561 équipée d'une cellule de charge de 500 N, avec une vitesse de déplacement de 2 mm/min. D'une autre part, les chargements cycliques sont réalisés sur un système d'essai électrodynamique MTS Acumen 3 à une fréquence de 2 Hz et un rapport de charge (R-ratio) de 0.1.

3. Résultats expérimentaux

3.1 Taux de restitution d'énergie

Lors d'un essai quasi statique, on note P la force nécessaire à l'ouverture δ des bras de l'éprouvette de largeur b . L'avancée de la fissure de longueur a est mesurée par post-traitement d'image. Le taux de restitution d'énergie critique peut être déterminé par la théorie des poutres modifiée :

$$G_{IC} = \frac{1}{b} \cdot \frac{3P\delta}{2a} \quad (\text{Eq. 1})$$

Si $G < G_c$, alors la fissure ne se propage pas ; si $G = G_c$, la fissure se propage de manière stable ; et enfin, si $G > G_c$, la fissure se propage de manière instable. Une autre méthode pour quantifier ce taux de restitution d'énergie est l'intégrale curviligne, qui est défini comme le taux de relaxation d'énergie de déformation par unité de surface de zone rompue au sein d'un matériau. Cette intégrale, introduite par Rice en 1968 [4] et développée par la suite [5] est issue des équations de mécanique de la rupture élasto-plastique : le contour Γ délimitant la zone plastique aux abords du front de fissure (appelé J) est indépendant du profil de fissure.

$$J = \int_{\Gamma} (Wdy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds) \quad (\text{Eq. 2})$$

On note W la densité d'énergie de déformation, T le vecteur des tractions, u le vecteur déplacement. De plus, si l'intégrale J est calculée le long d'un contour fermé dans un matériau élastique affranchi de singularités, il est prouvé (par le théorème de Green) qu'elle prend la valeur zéro. Appliqué à l'essai de DCB, l'intégrale se simplifie en prenant en compte la force de traction appliquée et l'angle d'ouverture des bras :

$$J_{IC} = 2 \frac{P}{b} \theta \quad (\text{Eq. 3})$$

Finalement, en superposant les résultats (voir Figure 4), on constate que la corrélation des deux méthodes de caractérisation est correcte, ce qui permet d'utiliser le calcul de J_{IC} à même valeur que celui de G_{IC} pour ce matériau. Ces résultats d'essais en chargement monotone serviront à la fois de données d'entrée pour la méthode de cyclage en fatigue et de référence pour les éprouvettes testées après réparation.

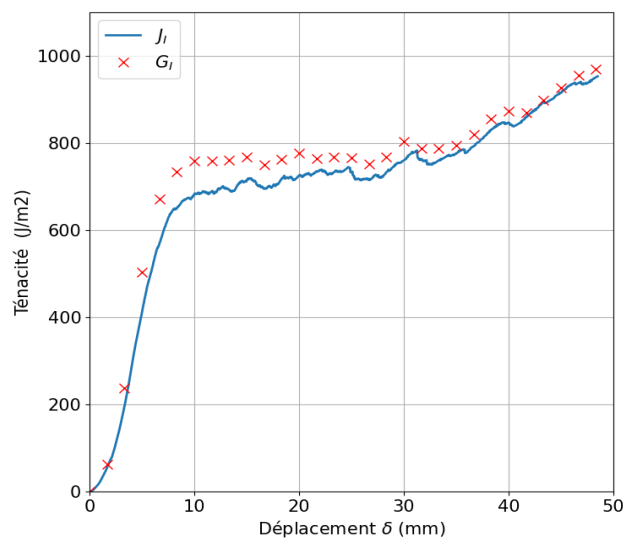


Figure 4: Comparaison de G_{IC} et J_{IC} sur un même essai de DCB

3.2 Paramétrage et validation en fatigue

La méthode d'essai en fatigue par contrôle du ΔG a été décrite et développée par Manca et al. [6] et déjà utilisée sur des matrices thermoplastiques [7]. Elle est programmée sur logiciel MTS (Multipurpose Elite™). Comme indiqué précédemment, cette méthode maintient constante la vitesse

de libération d'énergie cyclique ΔG ($G_{\max}-G_{\min}$) ainsi que le rapport de charge R en ajustant de manière continue les déplacements δ_{\min} et δ_{\max} au fur et à mesure de la propagation de la fissure, sur la base de la surveillance de la conformité.

Cette méthode nécessite l'automatisation du calcul de la longueur de la fissure, en remplacement de l'inspection visuelle. Utilisé par exemple par Brunner *et al.* [8] et Wilk [9], c'est un facteur clé pour réduire et optimiser la durée des essais de fissuration cyclique, en complément de l'optimisation de la fréquence.

Plusieurs données d'entrée matériau sont nécessaires pour initialiser le modèle : l'épaisseur e et la largeur b de l'éprouvette, le module de flexion à 0° E_f . Dans un second temps, il faut fixer le taux d'énergie libéré initial ΔG_0 , la longueur de pré-fissure initiale a_0 , le R-ratio fixé à $R = 0.1$, et la fréquence f . L'algorithme de pilotage permet de calculer la valeur de la complaisance C , la longueur de fissure a et par conséquent le taux d'énergie libérée ΔG :

$$a = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot E_f \cdot I \cdot C}{2}} \quad \text{où} \quad C = \frac{\delta}{P} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\Delta G = \frac{9EI}{4ba^4} * \delta_{\max}^2 * (1 - R^2) \quad (\text{Eq. 5})$$

Ces valeurs sont recalculées tous les n cycles permettant ainsi d'ajuster les valeurs de pilotage en déplacement de la machine : δ_{\max} , δ_{\min} si la tolérance n'est pas respectée. Un nombre maximum de N cycles est imposée par palier de ΔG

Afin de vérifier les paramètres choisis, une vérification visuelle de l'avancée réelle de la longueur de fissure a est faite sur une éprouvette (Figure 5). Enfin, le taux de croissance de la fissure $\frac{da}{dN}$ est extrait des résultats faisant apparaître plusieurs régimes de propagation (Figure 6).

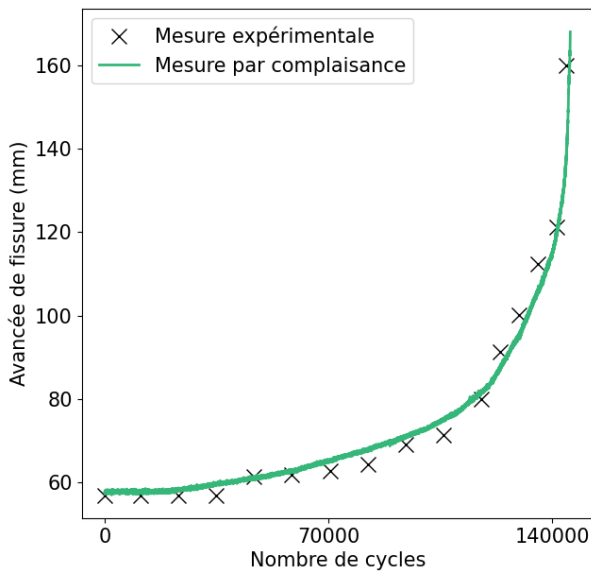


Figure 6 : Suivi de l'avancée de fissure sur l'éprouvette par mesure expérimentale et par automatisation.

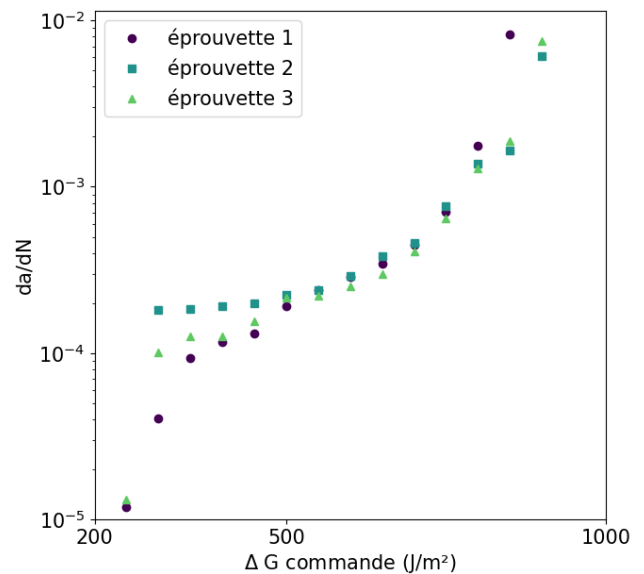


Figure 5: taux de croissance de la fissure après chaque palier ΔG de 10000 cycles.

Pour justifier la robustesse de la méthode, une étude concernant la variation de certains des paramètres va être réalisée, dans le but de fixer une condition d'essai spécifique. Celle-ci sera en effet réutilisée par la suite pour quantifier les effets liés à la réparation des éprouvettes.

4. Conclusion et perspectives

Les travaux présentés dans ce résumé portent sur la caractérisation de la tenue au délaminage de matériaux composites à fibres continues de carbones et matrice PPS. L'approche proposée dans ce travail s'appuie sur des méthodologies encore peu employées dans la littérature aussi bien pour des chargements statiques (utilisation de l'intégrale J à partir de données de CIN) que pour les chargements cycliques (approche à ΔG) constant.

Lors de la présentation, ces approches seront utilisées pour évaluer la tenue de composites réparés. Il existe plusieurs types de réparation sur les composites [10], et le choix se porte ici sur la cicatrization de la matrice, c'est-à-dire le maintien du matériau dans son intégralité pour une réutilisation identique, sans ajout de matière.

Références

- [1] Ivanov SG, Beyens D, Gorbatiikh L, Lomov SV, « Damage development in woven carbon fibre thermoplastic laminates with PPS and PEEK matrices: A comparative study. », *Journal of Composite Materials* Vol 51 (5), pp. 637 – 647, 2017.
- [2] J.P. Reis, M.F.S.F. de Moura, R.D.F. Moreira, F.G.A. Silva, « Pure mode I and II interlaminar fracture characterization of carbon-fibre reinforced polyamide composite », *Composites Part B: Engineering* Vol 169, pp. 126 – 132, 2019.
- [3] Sacchetti F, Groupe W.J.B, Warnet L.L, Villegas IF, « Effect of cooling rate on the interlaminar fracture toughness of unidirectional Carbon/PPS laminates », *Engineering Fracture Mechanics* Vol 203, pp. 126 – 136, 2018.
- [4] Rice J.R, « A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks », *Journal of Applied Mechanics* Vol 35, pp. 379-386, 1968.
- [5] Sarrado C, Turon A, Renart J, Costa J, « An experimental data reduction method for the Mixed Mode Bending test based on the J-integral approach », *Composites Science and Technology* Vol 117, pp. 85 – 91, 2015.
- [6] Manca M, Berggreen C, Carlsson LA. « G-control fatigue testing for cyclic crack propagation in composite structures », *Engng Fract Mech* Vol 149, pp. 375–86, 2015.
- [7] Arhant M, Lolive E, Bonnemains T, Davies P, « Fatigue crack growth properties of carbon-polyamide 6 thermoplastic composites using a multi- ΔG control method », *Engineering Fracture Mechanics* Vol 252, art. n°107825, 2021.
- [8] Brunner AJ, Murphy N, Pinter G, « Development of a standardized procedure for the characterization of interlaminar delamination propagation in advanced composites under fatigue mode I loading conditions », *Engng Fract Mech* Vol 76(18), pp. 2678–89, 2009.
- [9] Wilk J. « Compliance based method for testing fatigue delamination propagation in laminates », *Engng Fract Mech* Vol 203, pp.137–51, 2018.
- [10] Jefferson, A.J, Arumugam, V, Dhakal H.N, *Repair of polymer composites: methodology, techniques, and challenges*, Woodhead Publishing, 2018.