

Utilisation d'inserts interfaciaux pour renforcer le pontage et ralentir la propagation du délaminage dans les composites stratifiés

Use of interfacial inserts to enhance bridging and slow down delamination propagation in laminated composites

Luis Torres¹, Karin Saavedra² et Federica Daghia³

1 : Engineering Systems Doctoral Program, Faculty of Engineering
University of Talca
Curicó, Chile
luis.torres@utalca.cl

2 : Department of Industrial Technologies
University of Talca
Curicó, Chile
ksaavedra@utalca.cl

3 : Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS
LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay
91190, Gif-sur-Yvette
federica.daghia@ens-paris-saclay.fr

Résumé

La prévention et le ralentissement de la propagation du délaminage dans les matériaux composites représentent un enjeu majeur pour optimiser leur performance dans les applications industrielles avancées. Cette étude expérimentale examine la modification de l'interface entre des plis composites unidirectionnels par l'intégration d'inserts interfaciaux visant à améliorer la résistance au délaminage. Trois configurations ont été analysées : deux motifs en TPU, produits par impression 3D, et une couche de mat de fibres de verre. Les performances ont été évaluées et comparées à celles d'une interface sans inserts au moyen de deux essais, le *Double Cantilever Beam* (DCB) et le *Climbing Drum Peel* (CDP). Les résultats indiquent que les inserts produisent des ligaments de pontage efficaces sur une vaste *process zone*, ce qui contribue à la stabilisation et au ralentissement du délaminage. Cependant, l'efficacité des ligaments et la taille de la *process zone* varient entre les essais DCB et CDP en raison des différences de conditions locales (mixité modale) et globales (cinématique imposée pour le bras de pelage).

Abstract

Preventing and slowing down delamination propagation in composite materials is a major challenge for optimizing their performance in advanced industrial applications. This experimental study examines the modification of the interface between unidirectional composite plies through the integration of interfacial inserts aimed at improving delamination resistance. Three configurations were analyzed : two TPU patterns, produced by 3D printing, and a layer of glass fiber mat. Performance was assessed and compared to an interface without inserts using two tests : Double Cantilever Beam (DCB) and Climbing Drum Peel (CDP). Results indicate that the inserts produce effective bridging ligaments over a wide process zone, helping to stabilize and slow delamination. However, ligament efficiency and process zone size vary between DCB and CDP tests due to differences in local (mode mixity) and global (kinematics imposed on the peeling arm) conditions.

Mots Clés : délaminage, interfaces, pontage, *process zone*

Keywords : delamination, interfaces, bridging, process zone

1. Introduction

L'utilisation de composites stratifiés dans des applications de haute performance s'est rapidement développée en raison de leurs performances élevées. Cependant, l'une de leurs principales limites est leur susceptibilité au délaminage, un phénomène dans lequel les couches adjacentes se séparent,

compromettant l'intégrité structurelle. Une solution pour ralentir la propagation du délaminage est de faciliter le développement de mécanismes de dissipation sur une *process zone* de taille importante, par exemple à travers la création de ligaments de pontage. Différents travaux ont proposé de favoriser le pontage par l'introduction d'hétérogénéités dans la zone de jonction pour le cas du collage entre pièces composites ou métalliques [1, 2, 3]. Ici, une idée similaire est mise en oeuvre pendant la fabrication d'une pièce composite stratifié.

En particulier, différents types d'inserts sont considérés dans ce travail : deux motifs imprimés en 3D avec du TPU et un mat de fibres de verre. Les inserts sont incorporées entre les plis du stratifié au moment de la fabrication. L'efficacité de ces solutions est évaluée à l'aide de deux essais de délaminage, le *Double Cantilever Beam* (DCB) et le *Climbing Drum Peel* (CDP). Les deux essais permettent de caractériser la contribution des inserts pour différentes configuration structurelles et différents niveaux de mixité modale, et donc d'évaluer la robustesse des différentes solutions envisagées.

2. Matériaux et méthodes

2.1. Matériaux

Dans cette étude, nous utilisons le pré-imprégné HexPly M79/35%/UD300+2PES/CHS-50K, composé d'une matrice époxy M79 à 35% et d'un renfort en fibres de carbone UD300+2PE/CHS-50K. Une grille de dégazage (G-vent) est incluse sur une des surfaces du pré-imprégné, mais l'empilement utilisé ne comporte pas de grille au niveau de l'interface de délaminage. Deux types d'inserts ont été utilisés : TPU 92A (polyuréthane thermoplastique pour impression 3D), imprimé selon deux motifs différents, et mat de fibres de verre E-glass (225 g/m²).

2.2. Fabrication des échantillons

Pour la fabrication de l'insert TPU imprimé en 3D, une épaisseur de 0.7 mm a été choisie en raison des limitations techniques de l'imprimante Stratasys F270. L'impression a été effectuée à 235°C. Les deux motifs ont la même forme et taille de cellule, mais avec des orientations différentes par rapport à la direction de propagation de la fissure. Ils sont désignés sous les noms TPU-diamant et TPU-carré. La Figure 1 présente les dimensions des motifs et un schéma de l'éprouvette DCB.

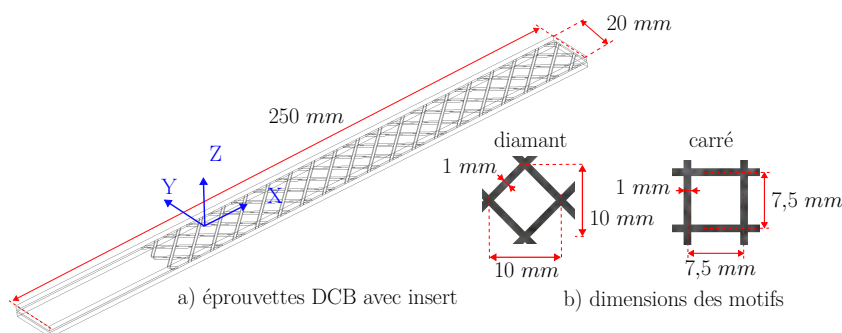


FIG. 1. – Schéma DCB : motifs TPU-diamant et TPU-carré

Les éprouvettes DCB et CDP ont la même séquence d'empilement $[0^\circ]_{16}$, mais l'interface délaminée est située entre les couches 8 et 9 pour le DCB et entre les couches 2 et 3 pour le CDP. Les inserts ont été positionnés entre les deux plis concernés pendant l'empilement, sans ajout de matrice supplémentaire. Une pré-fissure a été également créée dans la même interface à l'aide d'un film de démoulage. Des plaques de 250 mm x 250 mm ont été polymérisées dans une presse à plateaux chauffants pendant 1 heure à 120°C et sous une pression de 5 bars. Ensuite, elles ont été découpées en éprouvettes de 250 mm x 20 mm. L'épaisseur finale des plaques est de 4 mm pour la référence (sans insert), 4.12 mm pour l'insert en mat de fibres de verre, et 4.26 mm pour les inserts TPU. Les longueurs des pré-fissures

sont de 50 mm pour le DCB (avec une variabilité de 47 à 52 mm) et de 70 mm pour le CDP (avec une variabilité de 68 à 71 mm).

2.3. Protocoles des essais DCB et CDP

Les essais ont été réalisés sur une machine d'essai uniaxiale électromécanique Zwick-Roell Z100, conformément aux normes ASTM D-5528 pour les essais DCB [4] et ASTM D-1781 pour les essais CDP [5]. Les deux montages sont présentés sur la Figure 2. Pour l'essai DCB, des décharges ont été effectuées à 3 et 6 mm de déplacement, pour vérifier l'absence de déformations permanentes. Dans l'essai CDP, un déplacement maximal de 40 mm a été appliqué, suivi d'une décharge jusqu'à un déplacement nul. Les deux essais ont été réalisés à une vitesse de 1 mm/min. Trois échantillons ont été testés pour chaque configuration (type d'insert et type d'essai).

La force et le déplacement issus de la machine ont été mesurés pour les deux essais. En DCB, des photos de l'éprouvette prises pendant l'essai ont permis d'évaluer la longueur de fissure à différents instants du chargement, ainsi que d'obtenir le champ de déplacement complet par corrélation d'images numérique, travail en cours actuellement. En CDP, la position de la pointe de la fissure est simplement déduite de la géométrie de l'essai, comme expliqué dans [6].

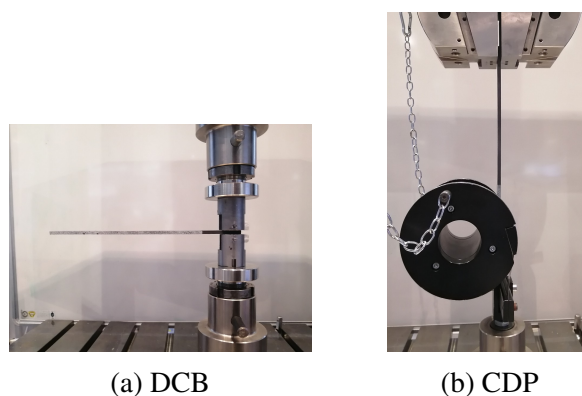


FIG. 2. – Montages essais DCB et CDP

2.4. Calcul des courbes R

Des méthodes de réduction des données inspirées de la littérature ont été adaptées et utilisées pour tracer le taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de la fissure, $G(a)$, pour chaque essai. Cette relation est connue en littérature comme "courbe R", elle permet de caractériser des phénomènes dissipatifs ayant une *process zone* de taille importante, comme ceux attendus en présence d'inserts. Ses caractéristiques sont liées tant aux propriétés de l'interface qu'à la configuration de l'essai considérée, elles peuvent donc varier en fonction du type d'essai. De plus amples détails sur le calcul des courbes R sont donnés dans [7].

3. Résultats d'essais et analyse

Les trois essais pour chaque type d'insert et configuration d'essai ont abouti à des résultats similaires. Une seule courbe est tracée pour chaque cas pour améliorer la lisibilité des figures.

3.1. Courbes force-déplacement

Un exemple de courbe force-déplacement pour chaque type d'insert et configuration d'essai est présenté sur la Figure 3. Pour l'essai DCB (Figure 3.a), la partie initiale de la courbe (élastique linéaire) est similaire pour tous les échantillons, et la non-linéarité apparaît à des niveaux de force entre 60 et 80 N. Les inserts montrent leur effet dans la région non linéaire : pour la configuration sans insert (appelée *baseline*), la force diminue immédiatement, tandis qu'avec les inserts, elle augmente avant

de diminuer plus lentement. Les courbes de tous les inserts montrent des performances supérieures au cas sans insert. La propagation reste globalement stable, à l'exception du TPU-carré, où des chutes de force instables sont observées.

Dans l'essai CDP (Figure 3.b), le premier plateau de force correspond à l'enroulement de la partie pré-délaminée autour du tambour et à l'élévation de ce dernier, alors que l'élévation successive de la force est associée à la propagation du délaminage. La réponse avec l'insert mat est proche de celle de l'éprouvette *baseline*, tandis que les éprouvettes avec inserts TPU montrent une augmentation plus progressive de la force et des valeurs maximaux plus élevés. En revanche, la propagation est relativement stable dans les cas *baseline* et insert mat, alors que des chutes de force indiquant des propagations instables sont observées pour les inserts en TPU.

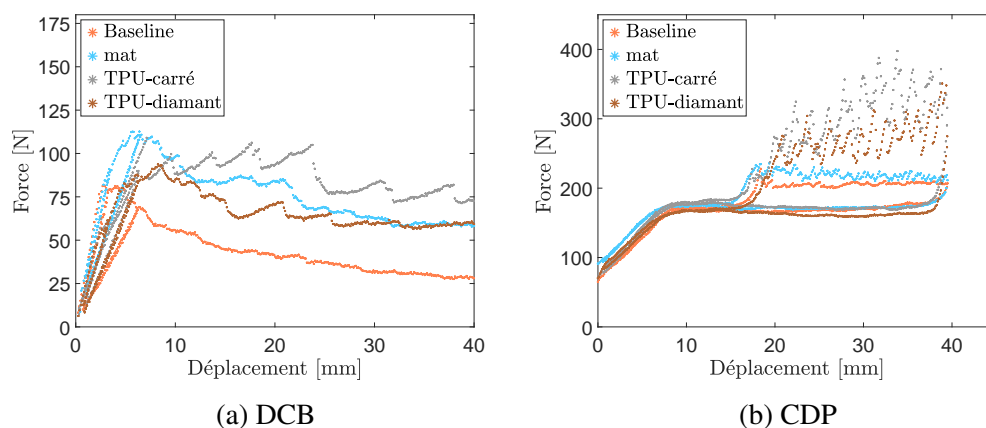


FIG. 3. – Courbes force-déplacement pour les essais DCB et CDP

3.2. Courbes R

La Figure 4 présente les courbes R des essais DCB et CDP, qui montrent l'évolution du taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de la fissure, permettant ainsi une comparaison directe des réponses à la propagation des fissures dans les deux essais.

Dans la configuration sans insert, le taux de restitution d'énergie est constant, avec des valeurs autour de $G_c \sim 430 - 440 \text{ J/m}^2$ pour les essais DCB et CDP. La plupart des échantillons avec inserts, inversement, montrent une augmentation de G sur une large plage de valeurs de a , ce qui indique la présence de phénomènes dissipatifs avec une taille importante de *process zone*. La présence de sauts dans les valeurs de a , observées pour certains inserts, indique des propagations instables de la fissure. En particulier, les inserts TPU donnent des courbes R similaires pour les essais DCB et CDP, bien que la réponse CDP soit plus instable. Les éprouvettes TPU-carré atteignent des valeurs de G plus élevées mais sont plus instables que les éprouvettes TPU-diamant. L'insert mat, d'autre part, montre un effet R significatif dans l'essai DCB, mais pas dans le CDP, où sa réponse est proche de celle de l'éprouvette *baseline*.

4. Mécanismes de rupture

Pour comprendre l'origine des différences entre les inserts et les types d'essais, des observations ont été effectuées sur les surfaces délaminées *post-mortem*. On retrouve les images des deux faces de chaque éprouvette dans la Figure 5. Pour les inserts TPU, une image agrandie est présentée en Figure 6, qui correspond à la zone marquée par un cadre blanc en Figure 5.

Dans les éprouvettes DCB (Figure 5.a, b et c; Figure 6.a et b), le matériau de l'insert est visible sur les deux surfaces. Cela est plus évident dans le cas de l'insert mat en raison de la couleur blanche des fibres de verre. La rupture a eu lieu au sein du composite (dans la matrice époxy et à l'interface

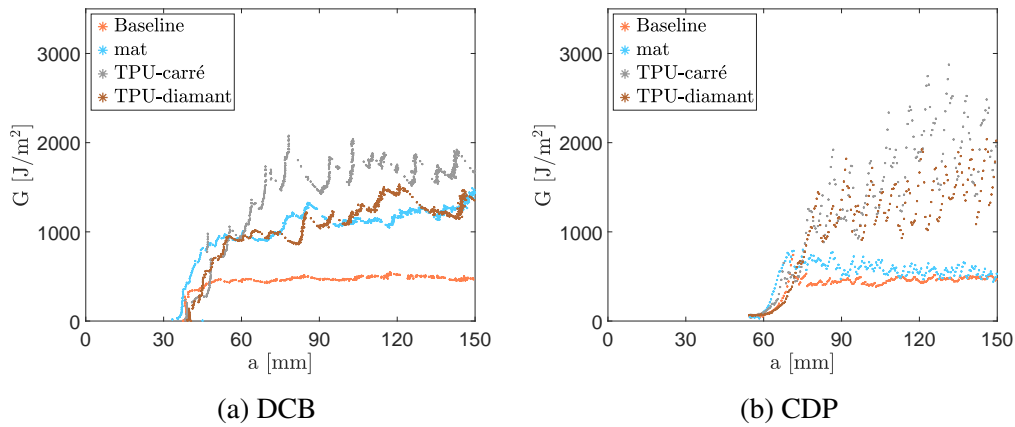


FIG. 4. – Courbes R pour les essais DCB et CDP

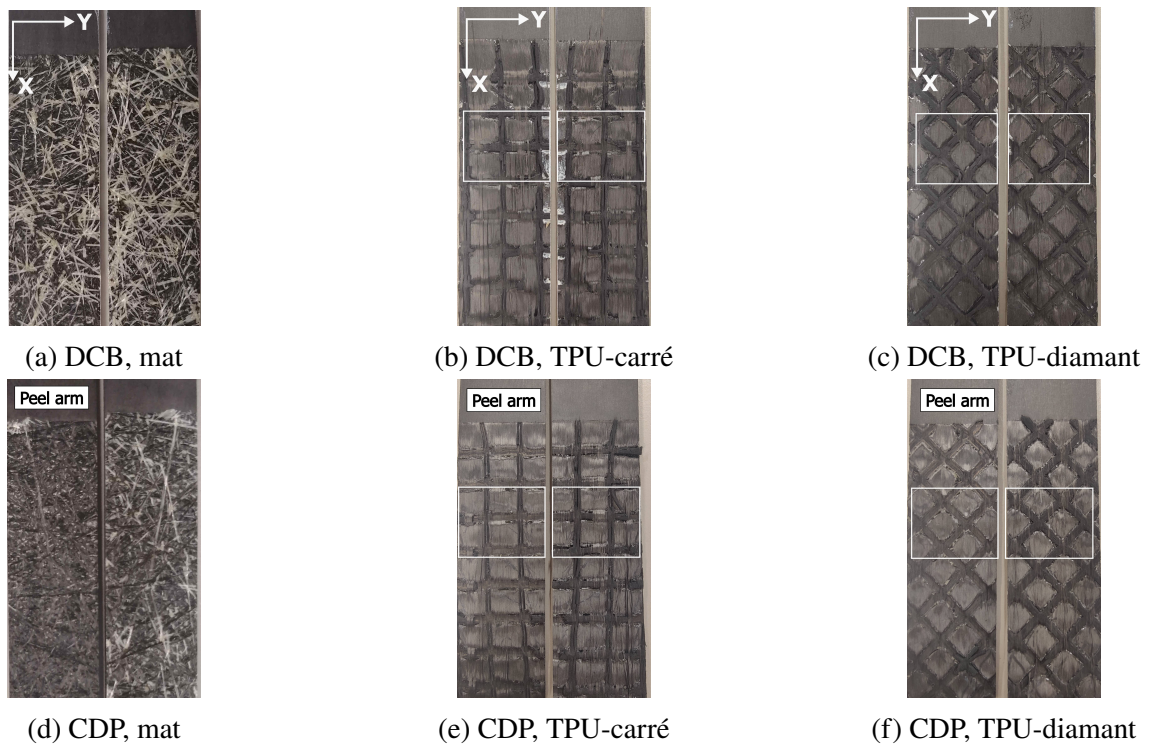


FIG. 5. – Surfaces de rupture en DCB et CDP (les carrés blancs sont montrés plus en détail en Figure 6)

époxy/fibres de carbone) mais aussi entre l’insert et le composite, et au sein de l’insert (pour le TPU, voir cercles en Figure 6.a et b). Ces mécanismes sont cohérents avec la création de ligaments observée pendant les essais.

Dans les éprouvettes CDP (Figure 5.d, e et f; Figure 6.c et d), la quantité de matériau d’insert présente sur le bras de pelage est minimale ou inexistante, quel que soit le type d’insert. Peu de ligaments TPU cassés ont été observés (voir cercles en Figure 6.c). Les mécanismes de dissipation sont limités aux défaillances internes au composite et à l’interface époxy/insert, ce qui témoigne d’une moindre création de ligaments et d’une réponse significativement différente par rapport aux essais DCB.

5. Conclusions et perspectives

Ce travail a proposé d’améliorer la réponse au délaminage dans les matériaux composites en favorisant la création de ligaments qui augmentent la dissipation d’énergie et maintiennent la stabilité lors de



FIG. 6. – Détails des surfaces de rupture en DCB et CDP pour les inserts TPU (voir la zone concernée en Figure 5)

la propagation des fissures. L'efficacité d'inserts en TPU et mat de verre a été évaluée à travers des essais DCB et CDP. Tous les inserts ont montré un ralentissement de la propagation du délaminage et une courbe R importante lors de l'essai DCB, alors que le mat de verre a une réponse très proche à celle du cas sans insert pour l'essai CDP. Les inserts TPU, d'autre part, permettent d'augmenter la dissipation d'énergie dans les deux configurations d'essai, mais la propagation est plus instable pour l'essai CDP que pour le DCB. La différence de réponse entre les deux essais est due à des conditions de propagation différentes, tant localement (mode I pour le DCB, mode mixte pour le CDP) et globalement (la cinématique du bras de pelage est imposée pour l'essai CDP). Une perspective de ce travail est l'identification expérimentale d'une loi cohésive à deux mécanismes par corrélation d'images numériques (DIC).

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer ses plus sincères remerciements à l'ENS Paris-Saclay, en particulier au LMPS, ainsi qu'à Xavier Pinelli, Francis Ventura et Benjamin Smaniotto, pour leur significative collaboration lors de la campagne expérimentale. L. Torres remercie également l'ANID pour la bourse N° 21210544 qui a permis de réaliser ce stage de recherche.

Références

- [1] R. Tao, X. Li, A. Yudhanto, M. Alfano, G. Lubineau « Laser-based interfacial patterning enables toughening of CFRP/epoxy joints through bridging of adhesive ligaments », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 139, pp. 106094, 2020, ISSN 1359-835X.
- [2] A. Yudhanto, M. Almulhim, F. Kamal, R. Tao, L. Fatta, M. Alfano, G. Lubineau « Enhancement of fracture toughness in secondary bonded CFRP using hybrid thermoplastic/thermoset bondline architecture », *Composites Science and Technology* Vol. 199, pp. 108346, 2020, ISSN 0266-3538.
- [3] K. Maloney, N. Fleck « Toughening strategies in adhesive joints », *International Journal of Solids and Structures* Vol. 158, pp. 66–75, 2019, ISSN 0020-7683.
- [4] ASTM-D5528 « Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites », *ASTM international* Vol. , pp. , 2013.
- [5] ASTM-D1781 « Standard test method for climbing drum peel for adhesives », *ASTM international* Vol. , pp. , 2012.
- [6] F. Daghia, C. Cluzel « The Climbing Drum Peel Test : An alternative to the Double Cantilever Beam for the determination of fracture toughness of monolithic laminates », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 78, pp. 70–83, 2015, ISSN 1359-835X.
- [7] L. Torres, K. Saavedra, F. Daghia « Experimental strategies to improve composite delamination response by promoting dissipation mechanisms at different length scales », *Submitted* Vol. , pp. , 2024.