

Résistance en traction d'un composite unidirectionnel à renforts discontinus

Tensile strength of aligned discontinuous composites

Yang Shi¹, Olivier Mantaux¹, Arnaud Gillet¹, Eric Lacoste¹

1 : Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295
15 rue Naudet CS 10207, 33175 Gradignan Cedex, France
e-mail : {yang.shi, arnaud.gillet, olivier.mantaux, eric.lacoste}@u-bordeaux.fr

Résumé

L'utilisation de fibres de carbone recyclées offre l'opportunité de réaliser un semi produit sous la forme d'une bande unidirectionnelle constituée de mèches alignées et discontinues. Les composites réalisés à partir de ce semi produit présentent actuellement des propriétés mécaniques prometteuses, mais avec une dispersion encore trop importante. Le transfert de charge entre mèches constitue un facteur clé de la résistance mécanique de ces composites. Afin d'appréhender ce mécanisme, des plaques sont réalisées avec des plis unidirectionnels coupés. Des architectures à double recouvrement permettent d'identifier les principales propriétés de l'interface, en s'appuyant sur une expression simplifiée du taux de restitution d'énergie. Enfin, la résistance d'architectures à simple recouvrement sont comparées avec des prédictions numériques effectuées sur Abaqus.

Abstract

Recycled carbon fibres allows creating a unidirectional tape composed of aligned and discontinuous tows. Composites made from this semi-product have promising, but still scattered mechanical properties. The stress-transfer between tows is a key factor affecting the strength of these composites. In order to understand this mechanism, plates were manufactured with interrupted unidirectional plies. Double overlap architectures allow defining the main properties of the interface, based on a simplified expression of the energy release rate. Finally the strength of single overlap architectures was compared with Abaqus numerical predictions.

Mots Clés : Fibres de carbone, renforts discontinus, recyclage, délaminage, transfert de charge.

Keywords : Carbon fibres, discontinuous reinforcement, recycling, delamination, stress transfert.

1. Introduction

Le développement de composites unidirectionnels à renforts discontinus fait l'objet de nombreuses études. Ainsi, des semis produits ayant ce type d'architecture permettent de réaliser des pièces de forme complexe grâce à leur grande déformabilité [1]. Un autre avantage de ces matériaux est de présenter une capacité à dissiper l'énergie les rendant moins fragiles qu'un matériau équivalent constitué de fibres continues [2, 3]. De plus, la compréhension des mécanismes de rupture de ces matériaux permettra de mieux tirer parti des fibres de carbone recyclées qui sont, elles-aussi, discontinues.

Une technologie de remise en forme de fibres de carbone recyclées permettant de réaliser des bandes continues de 30 mm de largeur contenant des fibres réalignées discontinues a été développée spécifiquement [4] (Fig. 1). Ces fibres discontinues, issues de la solvololyse, de la pyrolyse de déchets composites ou encore de chutes de découpe sèches ont une longueur allant de 50 à 150 mm.



Fig. 1. Préforme quasi unidirectionnelle constituée de fibres discontinues

La résistance en traction de ces composites est toutefois limitée, et présente une dispersion encore trop importante pour être exploitée dans des productions en série de type automobile. Pour optimiser et mieux maîtriser ses propriétés, il est alors nécessaire de comprendre et caractériser les mécanismes de rupture mis en jeu.

Les mécanismes de rupture dans les composites à fibres discontinues ont été largement étudiés. Les modèles de zone critique [5-7] sont basés sur une description statistique de la distribution de longueur et d'orientation des fibres pour évaluer le nombre de fibres efficaces dans une section. Ces modèles impliquent des mécanismes de rupture des fibres ainsi que d'endommagement matriciel [8,9]. L'influence de l'organisation des renforts a également été mise en évidence [10]. Tous ces modèles ont été validés dans le cas composites à fibres courtes.

Toutefois, les composites constitués d'un arrangement de mèches discontinues présentent des modes de ruine différents de ceux observés avec des composites à fibres courtes. Ce type de matériau se présente comme un assemblage de composites collés les uns aux autres, et le mode de ruine prédominant semble être le délaminage [11].

2. Matériaux de l'étude

2.1 Matériaux et réalisation

Les figures 1 et 2 représentent les schémas de principe des joints à double et simple recouvrement réalisés pour l'étude. Ils sont constitués de couches unidirectionnelles orientées dans la direction du chargement, et coupées de façon à ménager une longueur de recouvrement L_R . Chaque couche est constituée de deux plis de tissus unidirectionnel Hexforce® 48300 U 1000 E01 1F. Il est constitué de fibres AS4C 12K dont la résistance à la rupture est de 4482 MPa et le module de traction de 231 GPa (données fabricant).

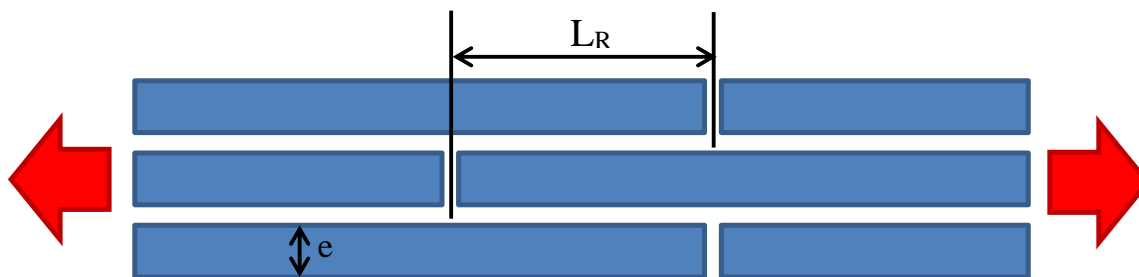


Fig. 2. Architecture d'une plaque avec joint à double recouvrement (3 couches = 6 plis)

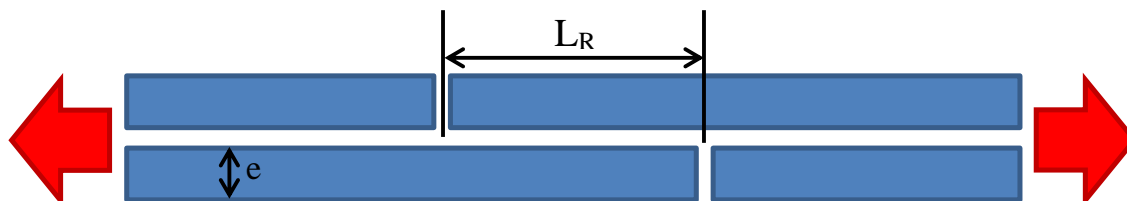


Fig. 3. Architecture d'une plaque avec joint à simple recouvrement (2 couches = 4 plis)

Les plis sont découpés au massicot, puis placés dans un moule métallique comportant une cavité rectangulaire de $280 \times 150 \text{ mm}^2$. Chaque pli est imprégné manuellement de résine Araldite® LY 5052. Les plaques sont obtenues par compression dans une presse à plateaux chauffants (40°C , 1 MPa). Dans chaque plaque, 6 éprouvettes de $280 \times 20 \text{ mm}^2$ sont découpées à la scie diamantée. Des talons constitués d'un stratifié verre-époxy à $\pm 45^\circ$ sont collés aux extrémités des éprouvettes.

2.2 Essais

6 plaques à double recouvrement ont été réalisées avec des longueurs de recouvrement comprises entre 5 et 105 mm. Une plaque de référence constituée de 6 plis unidirectionnels continus a également été réalisée, afin de déterminer la raideur et la résistance en traction des plis. Le tableau 1 récapitule le taux massique de fibres m et l'épaisseur moyenne e de chaque plaque.

Référence	L_R (mm)	e (mm)	m (%)
6PN	Fibres continues	1,53	78,47
6P6C5	5	1,53	88,42
6P6C11	11	1,80	79,81
6P6C15	15	1,72	74,26
6P6C20	20	1,72	72,82
6P6C75	75	1,83	69,81
6P6C105	105	1,56	78,13

Tab. 1. Caractéristiques des plaques à double recouvrement

9 plaques à simple recouvrement ont été réalisées avec des longueurs de recouvrement comprises entre 5 et 70 mm (Tab. 2).

Référence	L_R (mm)	e (mm)	m (%)
4P4C5	5	1,29	63,41
4P4C12	12	1,35	63,41
4P4C15	15	1,22	70,83
4P4C20	20	1,45	66,67
4P4C25	25	1,38	60,71
4P4C30	30	1,38	64,93
4P4C35	35	1,23	64,93
4P4C45	45	1,29	69,23
4P4C70	70	1,20	75,00

Tab. 2. Caractéristiques des plaques à simple recouvrement

Les essais de traction sont effectués à une vitesse de 2 mm/min. Dans le cas des éprouvettes à renfort continu, un extensomètre a été utilisé pour déterminer le module d'Young.

Compte tenu de la précision de la découpe, et de l'incertitude liée à la dépose manuelle des plis, la longueur de recouvrement réelle dans une éprouvette est différente de la longueur visée (Tab. 1 et 2). Pour pallier cette incertitude, les longueurs de recouvrement réelles sont mesurées au réglet après rupture (Fig. 6).

3. Modélisation de l'essai de traction

3.1 Modèle analytique

On considère un joint à double recouvrement comportant une fissure de longueur a (Fig. 7). On note L_R la longueur de recouvrement initiale. Compte tenu de la symétrie, on ne représente que la zone située au-dessus du plan médian de la plaque. On note e_1 la demi-épaisseur de la couche centrale et e_2 l'épaisseur de la couche supérieure.

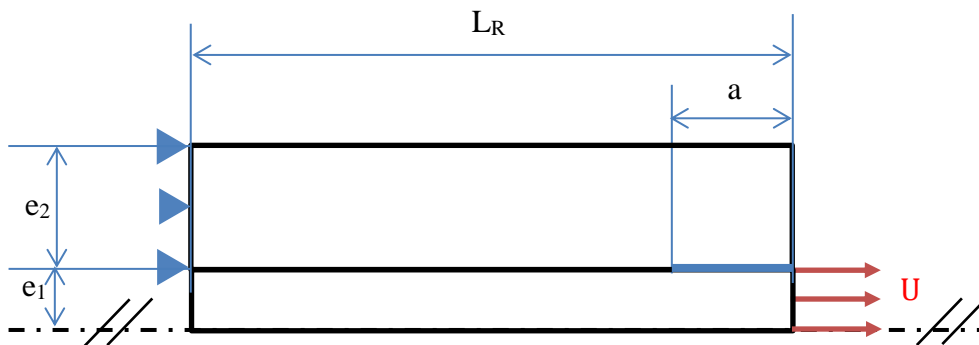


Fig. 7. Partie supérieure d'un joint à double recouvrement

Lorsque la longueur de recouvrement est faible, le niveau de cisaillement dans l'interface sera quasi uniforme. En notant τ_f la contrainte de cisaillement maximale admissible par l'interface, la contrainte maximale admissible par le joint σ_r est :

$$\sigma_r = \frac{L_R \tau_f}{e_1 + e_2} \quad (\text{Eq. 1})$$

Dans le cas d'une longueur de recouvrement suffisamment importante, on peut évaluer le taux de restitution d'énergie pour une fissure de longueur a se propageant à déplacement imposé (Eq. 2). On considère pour cela que les couches sont sollicitées en traction [3].

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{2 E_{11} e_1 G_{IIc}}{e_2 (e_1 + e_2)}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Où E_{11} est le module d'Young longitudinal des couches, G_{IIc} le taux de restitution d'énergie critique en mode II.

Ces deux relations vont permettre d'identifier les propriétés de l'interface. On doit en effet obtenir une relation linéaire entre la résistance et la longueur de recouvrement pour des longueurs de recouvrement faibles, puis une résistance indépendante de cette longueur [12].

Dans l'hypothèse d'une rupture des renforts, la résistance théorique d'une plaque peut être évaluée en considérant une rupture en traction de la couche située au niveau des interruptions des couches avoisinantes. En notant σ_{max} la contrainte à rupture en traction du pli unidirectionnel, le niveau de contrainte conduisant à une rupture en traction de la couche la plus sollicitée des joints double et simple recouvrement sera respectivement égale à $\frac{1}{3} \sigma_{max}$ (Fig. 2) et $\frac{1}{2} \sigma_{max}$ (Fig. 3). Ces valeurs sont reportées sur les Fig. 4 et 5.

3.2 Simulation numérique

L'essai est modélisé par éléments finis sur le logiciel Abaqus. Les couches ont un comportement élastique linéaire. L'épaisseur des couches est de 0,5 mm, la longueur totale est de 170 mm (longueur libre entre les talons). La propagation de l'endommagement est gérée par une loi d'adoucissement bilinéaire. La décroissance linéaire est calculée pour que l'énergie absorbée soit égale au taux de restitution d'énergie à l'interface dans chaque mode [13]. Le critère de délaminage en mode mixte est le critère de Benzeggagh-Kenane [14] (Eq. 3).

$$G_{Ic} + (G_{IIc} - G_{Ic}) \left(\frac{G_{II}}{G_T} \right)^\eta = G_{Tc} \quad (\text{Eq. 3})$$

Avec $G_T = G_I + G_{II}$

Le maillage est réalisé par des éléments réguliers de type quadrangle à quatre nœuds (Plan Strain-Linear-CPE4). La taille des éléments est de 0,1×0,1 mm². L'interface est modélisée par un contact surfacique ayant un comportement cohésif. Les propriétés mécaniques sont listées dans le tableau 3. Le module longitudinal des couches est issu des essais de traction sur les éprouvettes 6PN. Les autres propriétés élastiques sont tirées de données issues de la littérature sur des matériaux similaires [15].

Les propriétés de la réponse en cisaillement de l'interface sont identifiées avec les essais sur joints à double recouvrement. La pente à l'origine de la courbe $\sigma_r = f(L_R)$ (Fig. 4) a permis d'identifier la contrainte maximale admissible en cisaillement ($\tau_f = 27,6$ MPa) à partir de la relation (Eq. 1). Le palier est exploité pour déterminer le taux de restitution d'énergie en mode II ($G_{IIc} = 1,56$ N/mm) à partir de la relation (Eq. 2).

On suppose que pour les architectures étudiées les sollicitations normales influent peu. Les propriétés en mode I sont fixées à 50% de la résistance en cisaillement pour σ_n et 30% du taux de

restitution d'énergie en mode II pour G_{Ic} , afin d'avoir des ordres de grandeur cohérents avec la littérature [15]. L'exposant η est fixé arbitrairement à 2.

E_{11} (MPa)	E_{22} (MPa)	ν_{12}	G_{12} (MPa)	σ_n (MPa)	τ_f (MPa)	G_{Ic} (N/mm)	G_{IIc} (N/mm)	$K_n=K_t$ (N/mm ³)
120000	10500	0,3	5250	13	27,6	0,5	1,56	$1,3 \cdot 10^6$

Tab. 3. Propriétés mécaniques

Les conditions aux limites du domaine d'étude (Fig. 2) sont détaillées sur la Fig. 8. L'un des côtés est encasturé, et le côté opposé est bloqué verticalement et soumis à un déplacement uniforme.

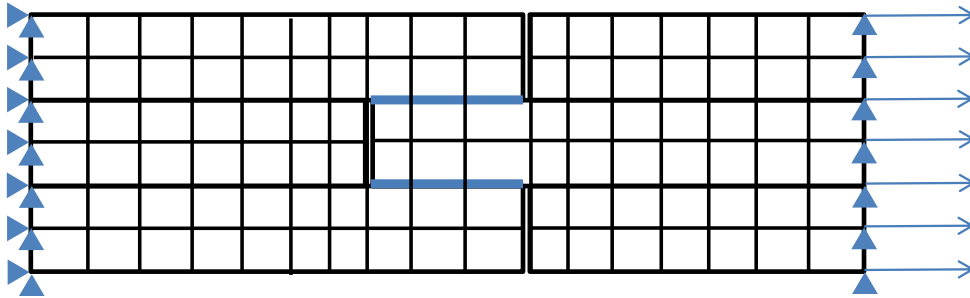


Fig. 8. Conditions aux limites en déplacement.

4. Résultats

4.1 Résultats expérimentaux et numériques

Les mesures effectuées sur les éprouvettes 6PN (fibres continues) sont résumées dans le tableau 4.

	Moyenne	Ecart type
Module d'Young E_{11} (GPa)	122,8	15
Contrainte à rupture σ_{max} (MPa)	2070	103

Tab. 4. Propriétés mécaniques en traction du pli unidirectionnel

La figure 4 présente l'évolution de la résistance des plaques avec joint à double recouvrement en fonction de la longueur de recouvrement L_R . On observe dans un premier temps que la résistance augmente avec la longueur de recouvrement L_R , puis, au-delà d'une longueur de recouvrement critique, elle reste constante et égale à la résistance maximale (Eq. 2). Pour cette architecture, la résistance maximale obtenue numériquement et expérimentalement est de 487 MPa. Elle est atteinte pour une longueur de recouvrement supérieure à la longueur de recouvrement critique $L_c = 20$ mm. Les courbes correspondant aux relations (Eq. 2) et (Eq. 3) sont également représentées.

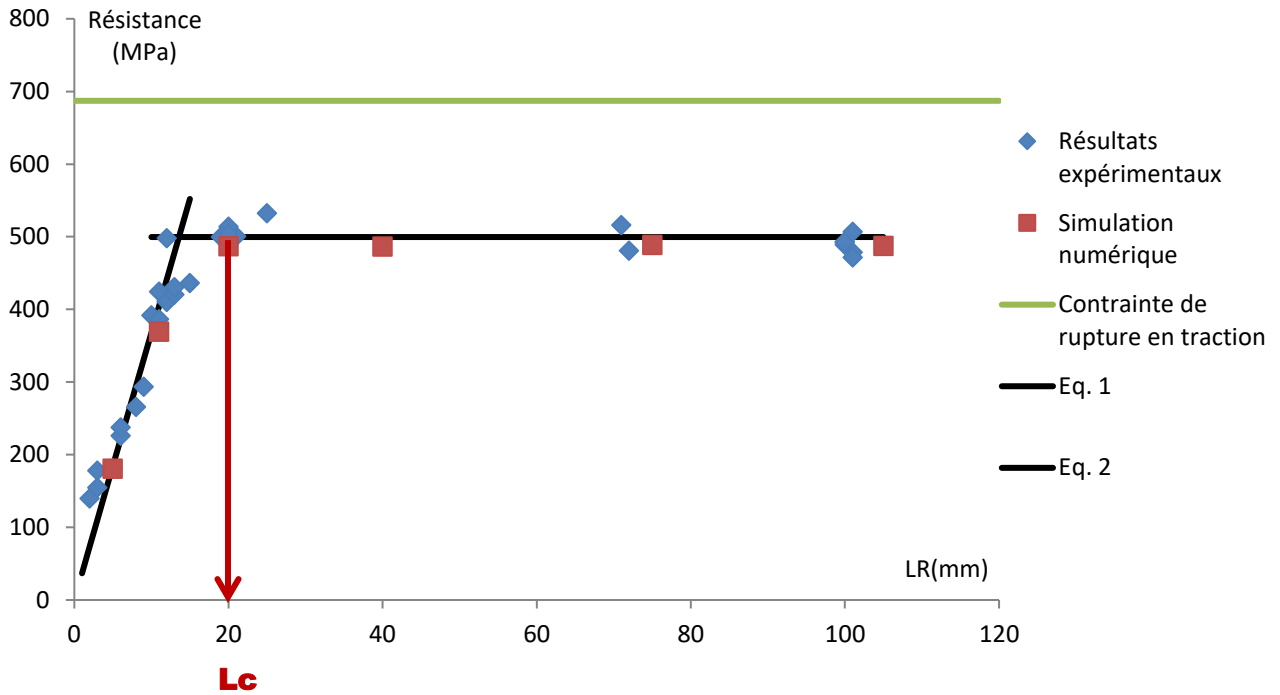


Fig. 4. Evolution de la résistance avec la longueur de recouvrement, joint à double recouvrement

L'évolution de la résistance des plaques avec joint à simple recouvrement avec la longueur de recouvrement L_R est présentée sur la figure 5. La résistance maximale obtenue numériquement et expérimentalement est de 560 MPa. La longueur de recouvrement critique de ces plaques à simple recouvrement est de l'ordre de 36 mm.

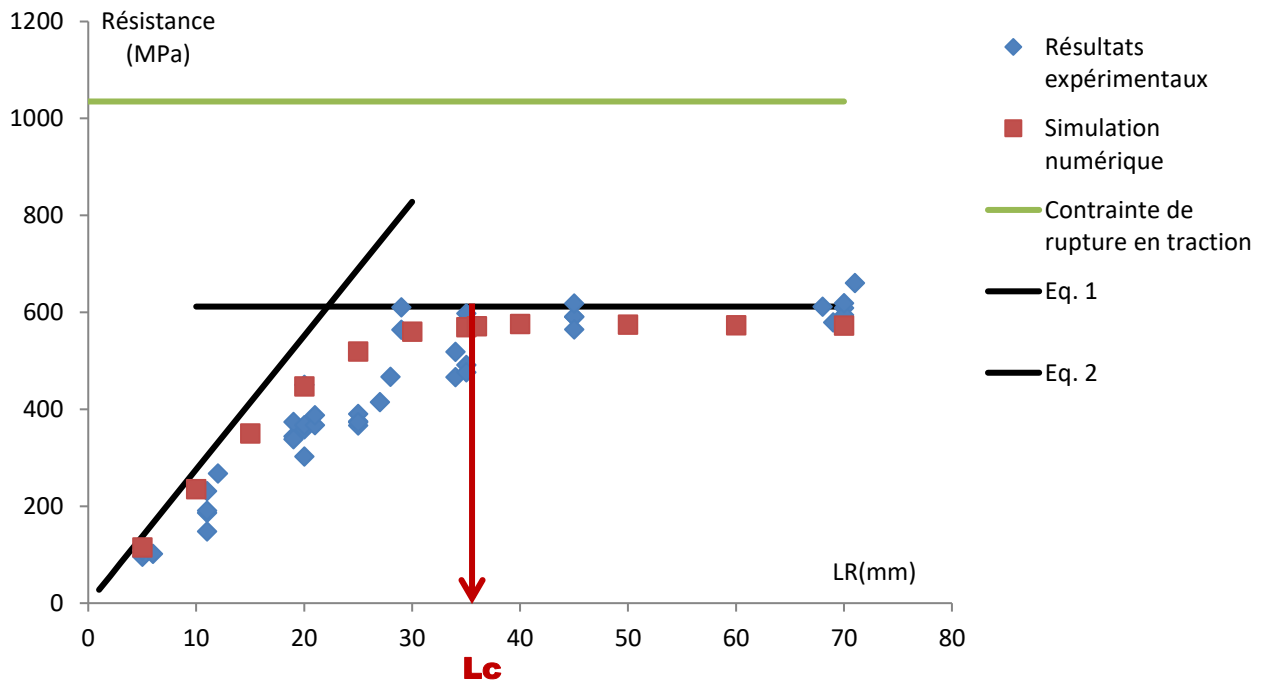
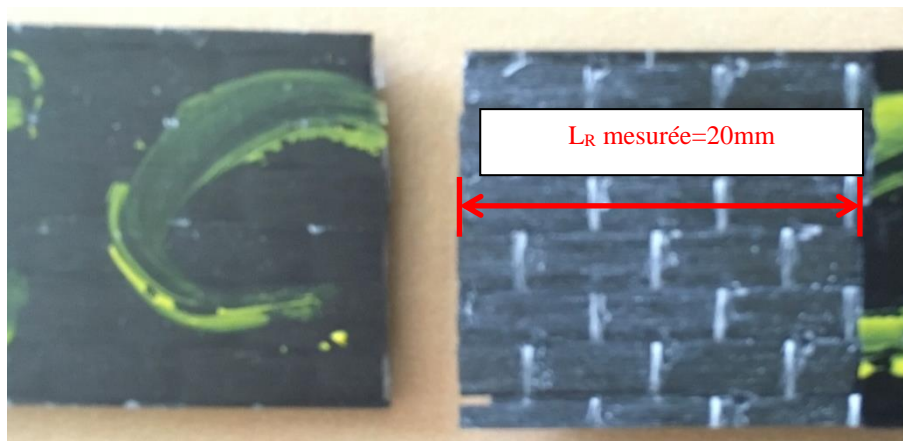
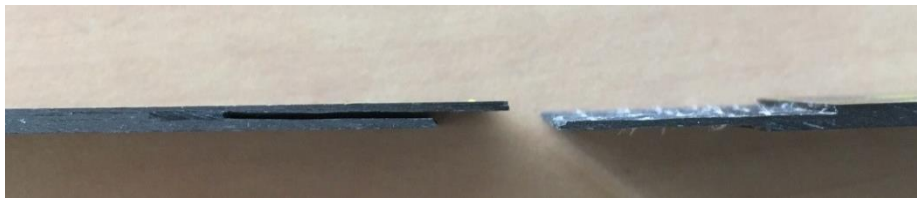


Fig. 5. Evolution de la résistance avec la longueur de recouvrement, joint à simple recouvrement

Pour l'ensemble des architectures testées, la rupture est due à du délaminage. La figure 6 représente une éprouvette rompue.



(a)



(b)

Fig.6. Détail d'une éprouvette rompue. (a) vue de dessus (b) vue de coté

4.2 Comparaison essais calculs

Les résultats des simulations numériques pour les plaques à double recouvrement sont représentés sur la figure 4. La transition entre les deux domaines est bien reproduite.

Les résultats des simulations sur joint à simple recouvrement (Fig. 5) sont proches des résultats expérimentaux. Ce joint étant asymétrique, les expressions (Eq. 2) et (Eq. 3) ne sont a priori pas parfaitement valides, car le joint est soumis à un moment fléchissant. On constate toutefois que ces relations restent acceptables, ce qui confirme l'hypothèse de contraintes normales faibles dans l'interface.

Sur les deux architectures testées, on met en évidence une longueur de recouvrement critique au-delà de laquelle la résistance du joint n'augmente plus. Cette longueur de recouvrement critique dépend de l'architecture testée.

5. Conclusion

Des essais de traction ont été réalisés sur des plaques composites constituées de couches unidirectionnelles carbone/époxy coupées. Les architectures testées étaient des joints à double et simple recouvrement, avec différentes longueurs de recouvrement.

Sur l'ensemble des essais, on a constaté une rupture par délaminage. La résistance du joint présente une évolution linéaire avec la longueur de recouvrement, jusqu'à une valeur critique à partir de laquelle la résistance reste constante même si la longueur de recouvrement augmente. Outre les propriétés mécaniques des constituants (fibre, matrice), cette longueur critique dépend de la géométrie du joint.

A partir des essais sur joint à double recouvrement, les propriétés caractéristiques du mode II de l'interface ont été identifiées. Il est à noter que cette méthode ne nécessite qu'un nombre limité d'essais pour obtenir ces propriétés. Cette étude met en évidence les principaux paramètres qui influent sur la résistance d'un composite à fibres discontinues :

- Les propriétés matériaux (raideur du renfort, taux de restitution d'énergie de la matrice)
- Les paramètres architecturaux (épaisseurs, agencement des renforts, longueur de recouvrement)

Ce modèle numérique, validé sur des géométries simples, va servir de base à des simulations sur des architectures plus réalistes pour évaluer les performances de nouveaux composites et aider à la décision dans un processus de recyclage (choix de la matrices, mélange de fibres, ...).

Références

- [1] Hang Li, Wen-Xue Wang, Yoshihiro Takao, Terutake Matsubara, « New designs of unidirectionally arrayed chopped strands by introducing discontinuous angled slits into prepreg », *Composites: Part A* 45, pp. 127–133, 2013.
- [2] Gergely Czél, Soraia Pimenta, Michael R. Wisnom, Paul Robinson, « Demonstration of pseudo-ductility in unidirectional discontinuous carbon fibre/epoxy prepreg composites », *Composites Science and Technology* 106, pp. 110–119, 2015.
- [3] Soraia Pimenta, Paul Robinson, « An analytical shear-lag model for composites with 'brick-and-mortar' architecture considering non-linear matrix response and failure », *Composites Science and Technology* 104, pp. 111–124, 2014.
- [4] A. Gillet, O. Mantaux, G. Cazaurang, « Characterization of composite materials made from discontinuous carbon fibres within the framework of composite recycling », *Composites: Part A*, n° 75, pp. 89–95, 2015.
- [5] Wetherhold RC. « Probabilistic aspects of the strength of fiber-dominated shortfiber composites I – aligned fiber ». *Mater Sci Eng*, n°91, pp. 7–12, 1987.
- [6] Wetherhold RC. « Probabilistic aspects of the strength of fiber-dominated shortfiber composites II – biased fiber distribution ». *Mater Sci Eng*, n°91, pp. 13–8, 1987.
- [7] Fu SY, Lauke B. « Effects of fiber length and fiber orientation distributions on the tensile strength of short-fiber-reinforced polymers », *Composites Science and Technology*, n° 56, pp. 1179–1190, 1996.
- [8] M. Hashimoto, T. Okabe, T. Sasayama, H. Matsutani, M. Nishikawa, « Prediction of tensile strength of discontinuous carbon fiber/polypropylene composite with fiber orientation distribution », *Composites: Part A*, n° 43, pp.1791–1799, 2012.
- [9] Henry J, Pimenta S, « Semi-analytical simulation of aligned discontinuous composites », *Composites Science and Technology*, n° 144, pp. 230–244, 2017.

- [10] H.F. Lei, Z.Q. Zhang, B. Liu, « Effect of fiber arrangement on mechanical properties of short fiber reinforced composites », *Composites Science and Technology*, n° 72, pp. 506–514, 2012.
- [11] E. V. Iarve, R. Kim, « Strength Prediction and Measurement in Model Multilayered Discontinuous Tow Reinforced Composites », *Journal of Composite Materials*, Vol. 38, No. 1, 2004.
- [12] Daniel Heim, Mathias Hartmann, Johannes Neumayer, Christian Klotz, Ömer Ahmet-Tsaous, Swen Zaremba, Klaus Drechsler, « Novel method for determination of critical fiber length in short fiber carbon/carbon composites by double lap joint », *Composites: Part B*, n° 54, pp. 365–370, 2013.
- [13] Camanho, P. P., and C. G. Davila, « Mixed-Mode Decohesion Finite Elements for the Simulation of Delamination in Composite Materials », *NASA/TM-2002–211737*, pp. 1–37, 2002.
- [14] Benzeggagh M.L, Kanane M, « Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composite with mixed-mode bending apparatus », *Composites Science and Technology*, 56, pp. 439-449, 1996.
- [15] C. Balzani, W. Wagner, « An interface element for the simulation of delamination in unidirectional fiber-reinforced composite laminates », *Engineering Fracture Mechanics*, n° 75, pp. 2597–2615, 2008.