



HAL
open science

**Effet de la couture sur le taux de restitution d'énergie
en mode mixte (I+II) de stratifiés Carbone/Epoxy =
Effects of stitching on fracture toughness of
Carbon/Epoxy laminates under Mixed-Mode (I+II)
Loadings**

Walid Trabelsi, Laurent Michel, Renaud Othomène

► **To cite this version:**

Walid Trabelsi, Laurent Michel, Renaud Othomène. Effet de la couture sur le taux de restitution d'énergie en mode mixte (I+II) de stratifiés Carbone/Epoxy = Effects of stitching on fracture toughness of Carbon/Epoxy laminates under Mixed-Mode (I+II) Loadings. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00385997

HAL Id: hal-00385997

<https://hal.science/hal-00385997>

Submitted on 11 Jun 2009

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.

Effet de la couture sur le taux de restitution d'énergie en mode mixte (I+II) de stratifiés Carbone/Epoxy

Effects of stitching on fracture toughness of Carbon/Epoxy laminates under Mixed-Mode (I+II) Loadings

Walid Trabelsi¹, Laurent Michel¹ et Renaud Othomène²

1 : Université de Toulouse ; INSA, UPS, Mines Albi, ISAE
ICA (Institut Clément Ader), DMSM
ISAE, BP 54032 ; 31055 TOULOUSE CEDEX 4
e-mail : walid.trabelsi@isae.fr , laurent.michel@isae.fr

2: Composite Stress Engineering Department, LATECOERE
135 rue de Périole, BP 5211, 31079 Toulouse Cedex 5, France
e-mail : renaud.othomene@latecoere.fr

Résumé

L'utilisation des structures composites tend à se généraliser dans le domaine aéronautique. Néanmoins, ces matériaux sont particulièrement vulnérables à des sollicitations hors plan pouvant générer du délaminage. Pour tenter de pallier ce problème, de nouveaux procédés de fabrication sont développés, notamment les renforts en z tel que la couture ou le z-pinning. Ces procédés ont pour objectif de renforcer la tenue interlaminaire en insérant des renforts traversant les différentes couches du composite.

La couture ou le « stitching » consiste à coudre les différents plis du composite entre eux, avant injection, et vise à augmenter la cohésion des différentes couches du stratifié et ainsi, à limiter la propagation des délaminages. Cette technique améliore le taux de restitution d'énergie et la résistance à l'impact.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de la couture sur le taux de restitution d'énergie des stratifiés composites résultant d'un empilement de tissus en carbone injectés par une résine époxy. Une campagne d'essais de mécanique de la rupture a été effectuée afin de déterminer un critère de propagation du délaminage pour les stratifiés Carbone/Epoxy cousus et non cousus. L'étude expérimentale est réalisée en mode I, mode II et mode mixte. Trois rapports de mode sont choisis en mode mixte (25%, 50% et 70 % de mode I). Les mécanismes de rupture de la couture et la propagation des fissures ont été analysés. L'émission acoustique a été utilisée pour détecter l'amorçage au cours des essais. La radiographie X a permis de déterminer la longueur des fissures après essais et d'évaluer la rupture des fils de couture.

Abstract

To delay progressive delamination and failure, in recent studies, laminated composites have been reinforced in the through-the-thickness (TTT) direction by means of stitching or Z-pinning reinforcement. This TTT reinforcement made the fracture more complex and caused many characteristic phenomena, so that the fracture energy for crack propagation is dramatically increased. The purpose of the present study is to characterize the delamination growth in a multidirectional stitched fabric laminate under Mode I, Mode II and Mixed Mode I/II loading conditions.

The mixed mode delamination behaviour of through the thickness reinforcement laminates was investigated using a Mixed-Mode Bending (MMB) tests. The fracture mechanism and crack propagation were analyzed and discussed. The energy required for crack propagation was calculated. In addition, acoustic emission was used to monitor damage accumulation during crack initiation and propagation. X-radiography was used to estimate crack length after tests and stitch failure. This allows finally making some comparison for the mixed mode propagation between unstitched and stitched specimens.

Mots Clés : stratifiés composites, Couture, Délaminage, mode mixte, critère de propagation

Keywords : Delamination, Polymer Matrix composites, Stitching, Mixed-mode Fracture, Woven Fabrics

1. Nomenclature

DCB : Double Cantilever Beam
TDCB : Tabbed Double Cantilever Beam
ENF : End Notched Flexure
MMB : Mixed-Mode Bending
 G_{IC} : Taux de restitution d'énergie en mode I
 G_{IIC} : Taux de restitution d'énergie en mode II
 G_{TC} : Taux de restitution d'énergie en mixed-mode
C : Complaisance
P : Effort au point de chargement
 δ : Déplacement au point de chargement
b : Epaisseur de l'éprouvette
 a_0 : Longueur initiale de la fissure
a : Longueur de la fissure au cours de l'essai
h : Epaisseur de l'éprouvette
L : longueur de l'éprouvette
k, m, n, C_0 : Constantes (déterminées expérimentalement)
E : Module de flexion
EI : Rigidité en flexion
 G_{12} : Module de cisaillement dans le plan
 χ : Facteur de correction

2. Introduction

Le problème le plus fréquemment rencontré par l'utilisation des matériaux composites est le phénomène du délaminage. Il est lié à la structure même de ces matériaux, puisqu'ils sont généralement constitués d'un empilement de nappes unidirectionnelles ou tissées noyées dans une matrice (résine époxy). Ainsi, un simple défaut au niveau du drapage (défaut de fabrication, porosité, pièce de film protecteur oubliée lors de la fabrication entre deux plis...) ou un léger impact, peut entraîner un délaminage, c'est-à-dire une décohésion des plis, ce qui aura pour conséquence une très nette diminution de la tenue de la structure.

Ainsi, pour tenter de pallier ce problème, de nouveaux procédés de fabrication sont en cours de développement, notamment les renforts en z tel que le stitching ou le z-pinning. Ces procédés ont pour objectif de renforcer la tenue inter-laminaire en insérant des renforts traversant les différentes couches du composite. Le procédé particulier du stitching consiste à coudre les différents plis de composite entre eux à l'aide d'un fil ayant de bonnes propriétés structurales (fil de fibre de verre, de carbone ou de kevlar).

Ce procédé est pour l'instant très peu industrialisé mais des études théoriques et expérimentales montrent que ce procédé peut améliorer significativement le taux de restitution d'énergie en mode I [1, 2], mode II [3] et mode mixte [4].

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de la couture sur le taux de restitution d'énergie des stratifiés composites résultant d'un empilement de tissu sec de carbone injecté par RTM par une résine époxy. Une campagne d'essais de mécanique de la rupture a été effectuée afin de déterminer un critère de propagation du délaminage pour les stratifiés Carbone/Epoxy cousus et non cousus. Les mécanismes de rupture de la couture et la propagation des fissures ont été analysés. L'émission acoustique est utilisée pour détecter l'amorçage au cours des essais. La radiographie permet de déterminer la longueur des fissures après essais.

Les essais DCB (Double Cantilever Beam) sont utilisés pour déterminer le taux de restitution d'énergie des stratifiés non cousus en mode I. Les études expérimentales [5] montrent que le principe d'essai DCB n'est pas convenable pour un laminé cousu. L'augmentation du taux de restitution d'énergie par la couture est telle que le coupon casse en flexion avant la propagation de la fissure. L'éprouvette est alors renforcée dans l'épaisseur par des talons Aluminium de part et d'autre du laminé. Ce qui donne un nouvel essai de ténacité en mode I appelé TDCB (Tabbed Double Cantilever Beam). Ce montage est basé sur le travail développé par Guenon et al. [6] et utilisé par Jain et al. [1] et Wood et al. [2]. Le principe de fonctionnement de cet essai est le même que le DCB.

Parmi les différentes configurations de tests développées afin de déterminer le taux de restitution d'énergie en mode II, l'essai ENF (End Notched Flexure) a été choisi pour sa simplicité dans le cadre de cette étude. L'éprouvette est chargée en flexion trois points. Dans le cas des stratifiés non cousus, les observations montrent que la propagation du délaminage est instable.

La propagation du délaminage dans les structures composites est généralement due à l'association de plusieurs modes élémentaires de rupture. Le mode mixte le plus couramment étudié est le résultat d'une

combinaison des deux modes les plus dangereux, c'est-à-dire le mode I et le mode II. Par conséquent, plusieurs montages expérimentaux ont été développés [4,7]. Le test MMB (Mixed-Mode Bending) est essentiellement une combinaison de l'essai DCB et l'essai ENF. Ce montage, en plus de sa facilité d'emploi, permet de faire varier les rapports modaux G_I/G_{II} avec la même géométrie de l'éprouvette indépendamment de la longueur de fissure et de la charge appliquée. De plus le rapport modal reste constant tout au long de l'essai [8].

3. Etude expérimentale

3.1 Matériau

Le matériau choisi pour cette étude est un empilement de tissus en fibres de carbone et une résine époxy injecté par le procédé RTM (Resin Transfert Molding). Il est développé pour des applications aéronautiques et utilisé pour la fabrication des pièces de structures des avions. Les éprouvettes sont découpées à partir des plaques de stratifiés. Le délaminage initial est créé par un défaut artificiel positionné entre les plis médians du stratifié lors du drapage par un film (13 μ m d'épaisseur). Un film de polytétrafluoroéthylène (PTFE) plus connu sous le nom industriel (Teflon) est utilisé car il ne se dégrade pas en dessous de 260°C, ne se mélange pas avec la matrice époxy et possède une très faible adhérence sur tout support (Fig. 1).

Pour des raisons de confidentialité industrielle, très peu d'informations seront données en ce qui concerne le procédé et la nature de la couture utilisée. On peut cependant préciser que les plaques de stratifiés sont cousus, avant injection, avec deux fils de Kevlar différents référencés ci-après comme *yarn A* et *yarn B*. La densité de couture choisie est égale à 2,5 st/cm².

Les plaques sont contrôlées par ultrason et par radiographie pour identifier la qualité de fabrication (porosité, délaminage) avant de subir des tests mécaniques.

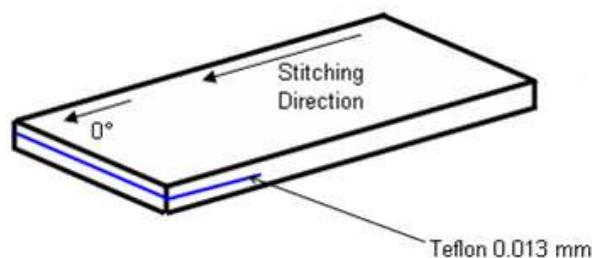


Fig. 1 : Représentation de la plaque du stratifié époxy/carbone

3.2 Méthodes d'essais

Le tableau suivant résume les dimensions géométriques et le type de couture des éprouvettes réalisées pour cette étude.

	Epaisseur	Longueur totale	largeur	Délaminage initial	Couture
DCB non cousu	3 mm	150 mm	25 mm	30 mm à 50 mm	Sans
TDCB non cousu	3 mm	150 mm	25 mm	30 mm à 50 mm	Sans
TDCB cousu	3 mm	150 mm	35 mm	30 mm à 40 mm	Yarn A
TENF non cousu	3 mm	100 mm	25 mm	15 mm à 35 mm	Sans
TENF cousu	3 mm	130 mm à 180 mm	35 mm	30 mm à 55 mm	Yarn B
MMB non cousu	3 mm	100 mm	25 mm	15 mm à 35 mm	Sans
MMB cousu	3 mm	100 mm	35 mm	15 mm à 35 mm	Yarn B

Tab. 1 : Spécifications des éprouvettes réalisées pour cette étude

En ce qui concerne les éprouvettes cousues, la largeur a été augmentée (de 25 à 35 mm) pour obtenir la densité de couture préconisée pour cette étude (2,5 st/cm²).

Les essais statiques en mécanique de la rupture ont été effectués sur une machine de traction à température ambiante et vitesse de déplacement imposée (0,5 et 2 mm/min). Deux capteurs d'efforts ont été utilisés selon le type d'essai, le premier a une capacité de 1 kN pour les essais DCB et MMB, et le second de 25 kN pour les essais TDCB et ENF.

Le déplacement est mesuré moyennant un capteur LVDT (Linear Variable differential transformer). Le suivi de la fissure a été réalisé à l'aide d'une caméra numérique reliée à un microscope qui permet de photographier l'éprouvette au cours de l'essai. Les éprouvettes ont été marquées sur le côté par stylo correcteur pour visualiser l'avancée de la pointe de fissure.

Les méthodes de calcul pour le dépouillement des résultats d'essai relèvent de la théorie des poutres et de la mesure expérimentale de l'évolution de la complaisance développée pour les composites dans le cadre de la mécanique linéaire élastique de la rupture [7, 8].

L'essai DCB est normalisé par l'ASTM [9] pour les stratifiés composites non cousus. L'éprouvette est sollicitée à l'aide de deux charnières articulées collées sur celle-ci. Le test consiste à exercer des efforts de traction sur ces deux charnières, qui provoquent la déflexion (δ) mesuré par le déplacement de la traverse et la propagation de la fissure (a) dans l'éprouvette. Les dimensions de l'éprouvette DCB non cousues sont définies dans le *Tab. 1*.

Plusieurs études expérimentales ont montré que le principe d'essais DCB n'est pas convenable sur un laminé cousu. L'éprouvette est alors renforcée par des plaques en aluminium de part et d'autre du laminé. Les dimensions de l'éprouvette TDCB et le montage sont définis sur la *Fig. 2*. Ils sont validés par des essais sur des éprouvettes non cousues en DCB et TDCB. L'épaisseur des talons d'aluminium collés à l'éprouvette est égale à 10 mm.

Le taux de restitution de l'énergie en mode I (G_I) des stratifiés cousus est calculé moyennant une méthode déterminée par Dransfield et al. [1] (*Eq. 1*). Le déplacement de chaque lèvres de l'éprouvette est calculé comme la somme du déplacement dû à la flexion et du déplacement dû au cisaillement.

$$G_I = \frac{P^2}{w} \left[\frac{(a + \chi h)^2}{EI} + \frac{6}{5G_{12} hw} \right] \quad \text{Eq. 1}$$

EI est la rigidité en flexion du système composite et renfort aluminium, w est la largeur de l'éprouvette et G_{12} est le module de cisaillement dans le plan de l'éprouvette renforcée. Le facteur de correction (χ), a été introduit par les auteurs pour prendre en compte la non linéarité du profil du front de délaminage. Il est déterminé à partir des résultats expérimentaux des stratifiés non cousus.

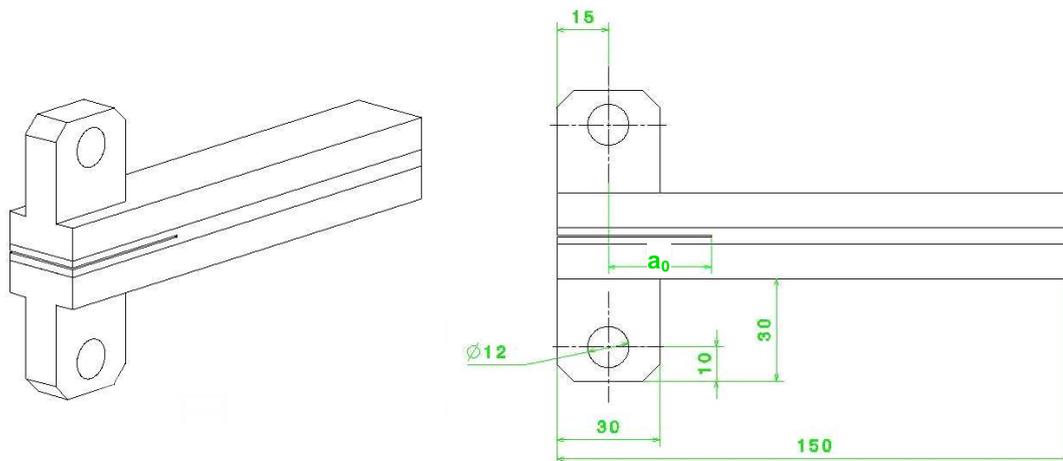


Fig. 2 : Eprouvette TDCB

En ce qui concerne le mode II, l'essai de délaminage en mode de glissement droit a pour objectif de caractériser le délaminage en cisaillement des matériaux composites. Ce mode de rupture n'est pas normalisé. L'éprouvette contenant un défaut artificiel sur un de ces côtés est chargée en flexion trois points.

L'essai choisi en mode mixte, est standardisé par la norme ASTM [10], il est inspiré de la combinaison du test de mode I pur (DCB) et de mode II pur (ENF). Le principe de cet essai consiste à appliquer un effort sur le bras de levier afin d'obtenir, simultanément, un chargement en mode I (ouverture de la fissure) et en mode II (glissement des lèvres). L'étude expérimentale est réalisée de façon à déterminer une loi de mode mixte I/II aux trois points de mode mixte suivant : 70% de mode I, 50% de mode I et 25% de mode I.

4. Résultats

Les essais réalisés dans le cadre de cette étude ont pour but de déterminer un critère de propagation des stratifiés non cousus et cousus. Tous les résultats de ténacité des stratifiés cousus et non cousus sont récapitulés dans le tableau suivant :

			G_{IC} (J/m ²)	G_{IIC} (J/m ²)	G_{TC} (J/m ²)
Essais de la mécanique de la rupture	Mode I	DCB non cousu	750	-	-
		TDCB non cousu	850	-	-
		TDCB Cousu	3500	-	-
	Mode II	ENF non cousu	-	1820	-
		ENF cousu	-	3020	-
	Mode Mixte	MMB 25 % non cousu	-	-	1410
		MMB 50 % non cousu	-	-	1100
		MMB 70 % non cousu	-	-	1000
		MMB 25 % cousu	-	-	1920
		MMB 50 % cousu	-	-	4280
	MMB 70 % cousu	-	-	4190	

Tab. 2 : Récapitulatif des valeurs expérimentales moyenne de la ténacité des stratifiés cousus et non cousus

Les courbes effort-déplacement pour les éprouvettes DCB et TDCB sont linéaires jusqu'au démarrage de la propagation de la fissure. L'activité acoustique montre ensuite une activité régulière tout au long de l'essai (Fig. 3).

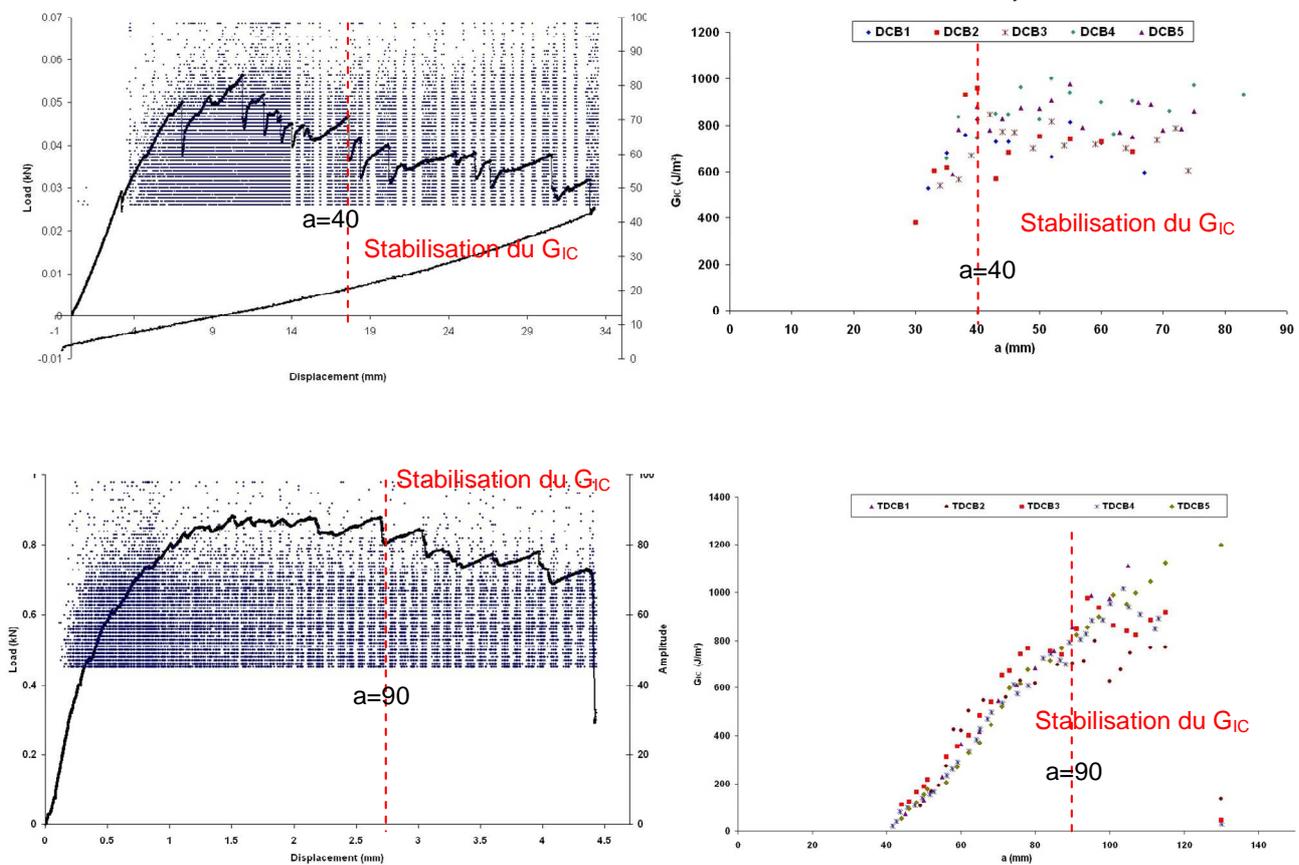


Fig. 3 : Courbes $F=f(\delta)$ et $G=f(a)$ des essais DCB et TDCB non cousus (3mm)

Pour les essais DCB la courbe $F=f(\delta)$ atteint assez rapidement un maximum et décroît au fur et à mesure de l'avancée de fissure. Il faut noter que la propagation de la fissure se fait par à-coups se traduisant par les irrégularités observées dans la courbe force-déplacement. Ce phénomène caractéristique pour les tissus est associé au pontage des mèches constitutives du tissu. En ce qui concerne les essais TDCB la courbe $F=f(\delta)$ atteint plus lentement un maximum quand la fissure présente déjà une avancée significative. Pendant la phase de décroissance de l'effort les irrégularités associées aux à-coups de propagation de la fissure des tissus sont gommées par la présence des talons d'aluminium qui augmente fortement la rigidité de l'éprouvette.

Les calculs pour chaque avancée de la fissure des taux de restitution d'énergie montrent un bon accord des valeurs de G_{IC} à propagation pour les 2 configurations d'éprouvettes. La valeur moyenne du taux de restitution d'énergie des essais DCB est égale à 750 J/m² pour les stratifiés non cousus. Dans le cas des essais TDCB non cousus, la valeur moyenne est égale à 850 J/m². L'éprouvette DCB montre qu'une valeur

stable de propagation est atteinte rapidement à partir de 40mm. L'éprouvette TDCB montre une évolution quasi linéaire du G_I jusqu'à l'atteinte d'un plateau vers $a=90$ mm pour lequel on retrouve la valeur de G_{IC} du tissu.

La présence des talons d'Aluminium, qui augmente fortement la raideur de flexion des éprouvettes, retarde donc l'obtention d'une valeur de propagation stable pour G_I mais n'empêche pas la détermination de cette valeur.

La couture augmente notablement la tenue de l'éprouvette à la propagation de fissure comme on peut le voir même sur la courbe effort-déplacement (Fig. 4).

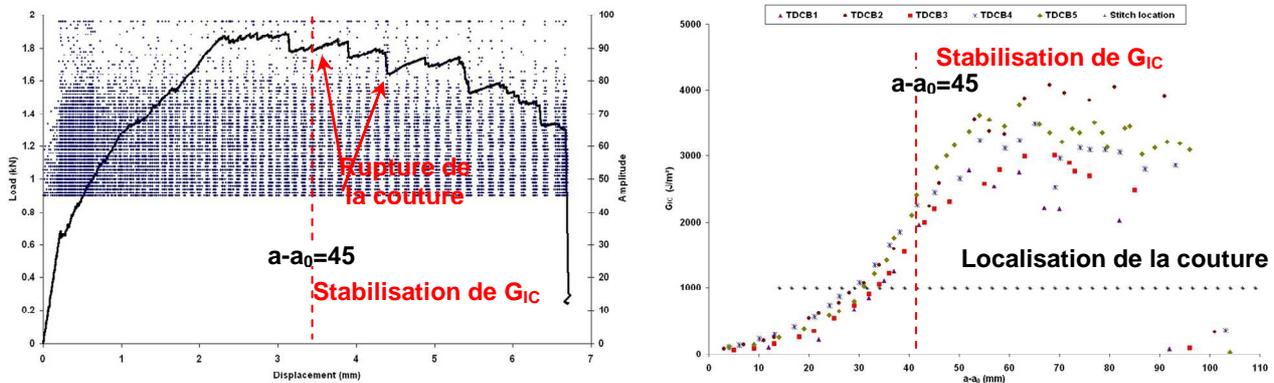


Fig. 4 : Courbes $F=f(\delta)$ et $G=f(a)$ des essais TDCB cousus (3mm)

L'évolution des taux de restitution d'énergie montre comme pour le TDCB non cousu une stabilisation de G_{IC} à partir d'une longueur importante de fissure propagée.

La courbe-R de ténacité montre que 8 rangées de 2 fils de couture au maximum sont sollicitées lors de l'ouverture des bras de l'éprouvette. Quand l'effort augmente, la fissure propage de manière instable entre les rangées successives de coutures. On note à la première rupture d'une rangée de fils de couture une chute notable de l'effort. Quand le front de fissure atteint la première rangée de fils, la courbe R présente une augmentation rapide qui va de pair avec un accroissement des fils de couture qui font pontage entre les lèvres de la fissure. G_{IC} augmente jusqu'à une valeur critique de la longueur de propagation ($a-a_0=45$ mm) et atteint une valeur moyenne de 3500 J/m^2 . Cette étude expérimentale montre que la couture améliore la tenue en mécanique à la rupture et augmente de plus de 3 fois le taux de restitution d'énergie en mode I.

Au cours des essais TDCB, il a été observé la création des pontages de fibres (Fig. 5) avant la rupture des fils de couture. Dès que la première rangée de fils cède face à la charge appliquée, la fissure se propage rapidement et la ténacité augmente. A ce moment, la propagation devient instable et l'avancement de la fissure dépend de la rupture des fils de couture.

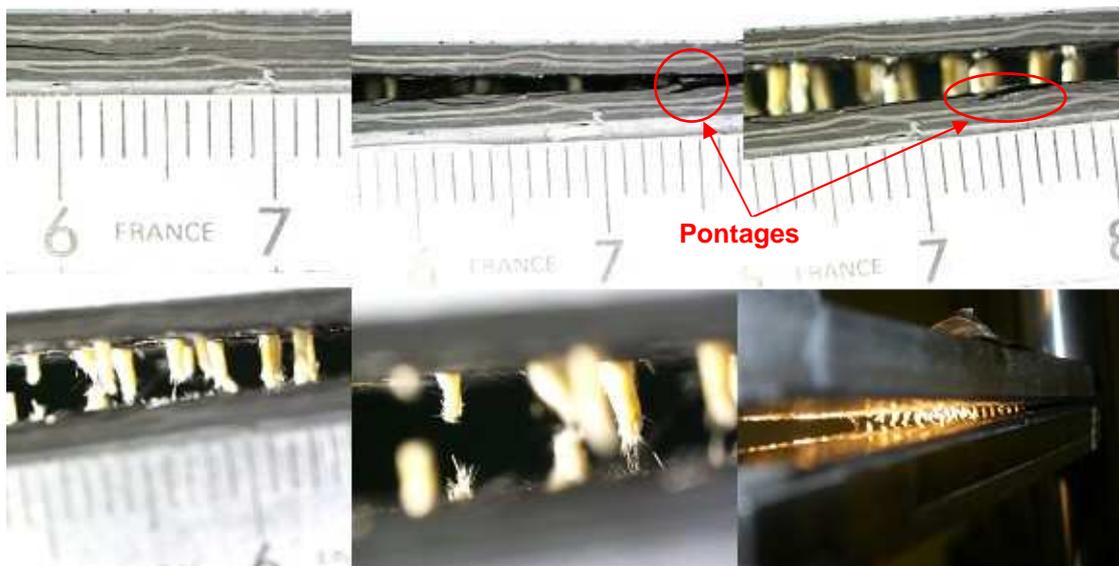


Fig. 5 : Photographies des essais TDCB cousus

Les essais de délaminage en mode II sont réalisés avec des éprouvettes ENF (End Notched Flexure). La propagation de la fissure est instable dans le cas des stratifiés non cousus. La propagation est stable pour les éprouvettes cousus (Fig. 6).

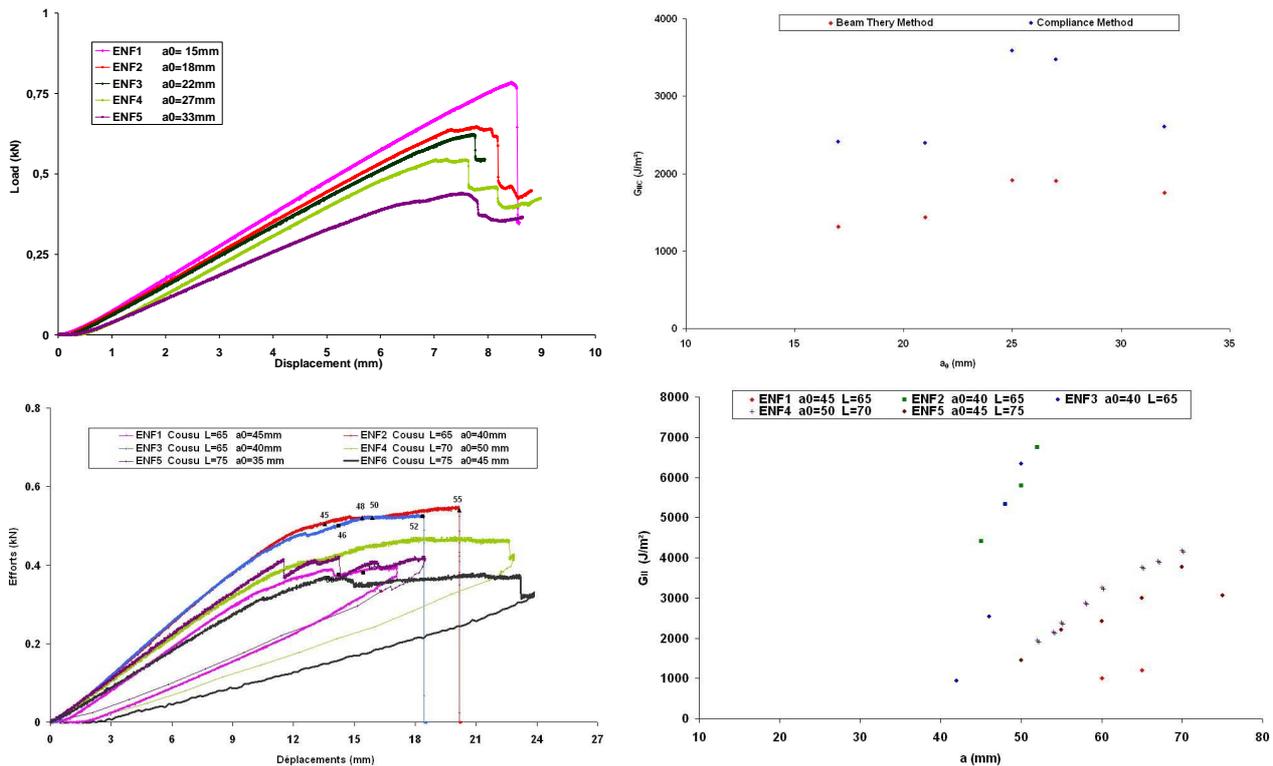


Fig. 6 : Courbes $F=f(\delta)$ et $G=f(a)$ des essais ENF non cousus et cousus (3mm)

Les valeurs moyennes de ténacité en mode II sont égales à 1820 J/m^2 pour le cas des stratifiés non cousus. L'évolution de G_{IIc} est plus importante pour le cas des stratifiés cousus. Mais si l'on fait la moyenne des valeurs on obtient une valeur de 3020 J/m^2 qui est bien supérieure à celle des non-cousus (Tab. 2). Néanmoins les observations par radiographie X (Fig. 7) révèlent que la fissure se propage jusqu'à la moitié de la longueur des éprouvettes cousues mais aucune rupture de fil de couture n'est observée. Les valeurs déterminées ne permettent donc pas d'évaluer correctement la contribution de la rupture des fils au taux de restitution d'énergie de mode II pour ces matériaux cousus. Il est cependant intéressant de noter la possibilité d'une propagation de fissure de délaminage sans rupture du renfort 3D et ce sur une grande distance.



Fig. 7 : Radiographies X de l'éprouvettes ENF cousu (3mm)

Les essais en mode mixte sont mis en place selon la méthode MMB. Les observations montrent que la propagation de la fissure est totale dans le cas des stratifiés non cousus. Alors que pour le cas des stratifiés cousus, la propagation dépend du rapport de mode (Fig. 8).

Pour le cas du rapport de mode de 25%, la courbe effort-déplacement est linéaire durant tout l'essai et la propagation de la fissure est stable. Les observations par radiographie montrent que la fissure atteint le poinçon. Néanmoins, aucune rupture des fils de couture n'est observée.

Les éprouvettes testées en MMB, pour un rapport de mode égale à 50%, montrent une propagation incomplète de la fissure et la rupture en flexion de l'éprouvette. La valeur moyenne de la fissure est égale à 42mm. La rupture des premières rangées de fil de la couture a été détectée par observations directes au cours de l'essai et par radiographie après le test (Fig. 8).

Pour le cas du rapport de mode de 70% de mode I, la longueur finale de la fissure après propagation présente une moyenne de 33 mm. Les observations montrent une rupture en flexion de l'éprouvette et la rupture des premières rangées de couture (Fig. 8).

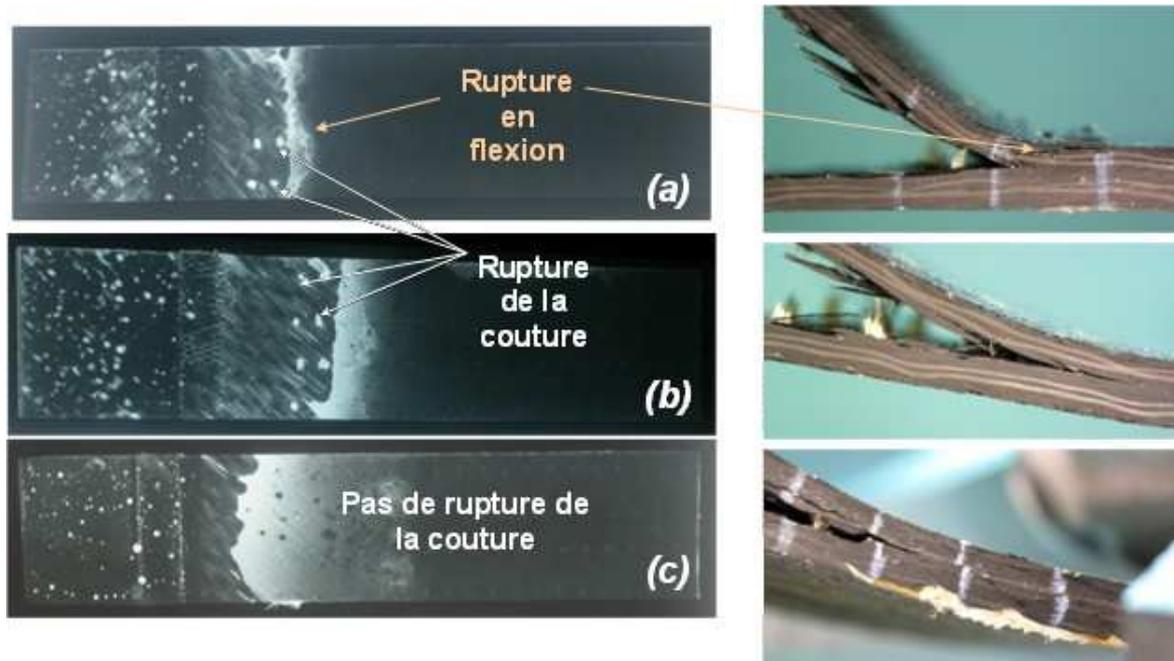


Fig. 8 : Observations et radiographies X des éprouvettes MMB cousues
(a) 70% de mode I (b) 50% de mode I (c) 25% de mode I

Les résultats des essais MMB montrent que la couture améliore considérablement le taux de restitution d'énergie total pour le cas des rapports de mode égaux à 70% et 50%. En ce qui concerne les éprouvettes testées à 25%, la valeur moyenne de ténacité des stratifiés cousus est légèrement supérieure à la valeur moyenne du stratifié non cousu. Ces valeurs expérimentales ne permettent pas de prendre en compte l'effet de la couture vu qu'aucune rupture de fil n'a été observée. Un changement de la géométrie de l'éprouvette peut résoudre ce problème.

5. Critères de propagations

Un critère de propagation du délaminage en mode mixte (I+II) pour les stratifiés cousus et non cousus peut être identifié à partir des résultats expérimentaux du taux de restitution d'énergie en mode I, mode II et mode mixte regroupés sur le même graphique (Fig. 9).

Pour le cas des stratifiés non cousus, les valeurs moyennes expérimentales du taux de restitution d'énergie permettent de décrire d'une manière satisfaisante la propagation du délaminage dans le composite par un critère linéaire (Fig. 9).

Pour les stratifiés cousus, les valeurs moyennes expérimentales du taux de restitution d'énergie ne permettent pas de déduire un critère de propagation du délaminage. Il apparaît évident à partir du graphique (Fig. 10) que la valeur moyenne en mode mixte à 25% est sous-estimée par rapport à la valeur réelle. Les observations réalisées sur les éprouvettes après essai (mode mixte à 25%) ne montrent aucune rupture des fils de couture. Les mêmes constatations sont réalisées pour les stratifiés sollicités en mode mixte à 50% et en mode II.

Seules les valeurs expérimentales du taux de restitution d'énergie des éprouvettes cousues testées en TDCB et MMB à 70% peuvent être considérées comme satisfaisantes (Fig. 10) car permettant d'atteindre la rupture des fils de couture. D'autres méthodes expérimentales sont en cours d'investigation pour obtenir des résultats satisfaisants en mode II, 50% et 25% en mode mixte.

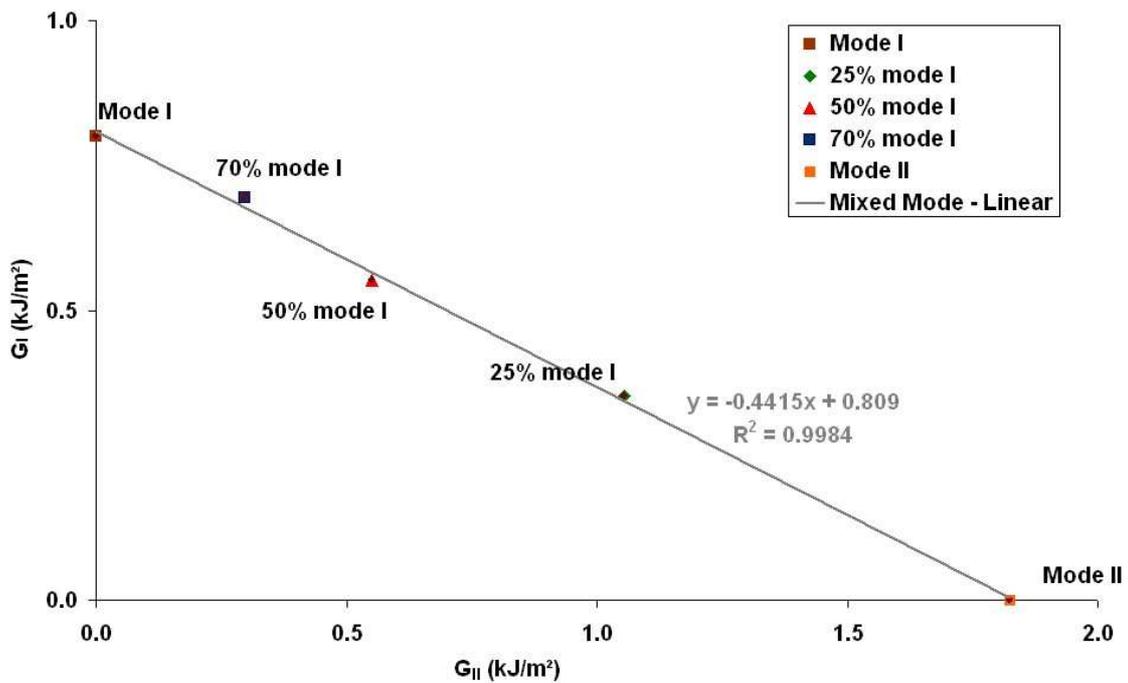


Fig. 9 : Réponse en rupture sous sollicitations de mode mixte (I+II) pour le stratifié non cousu

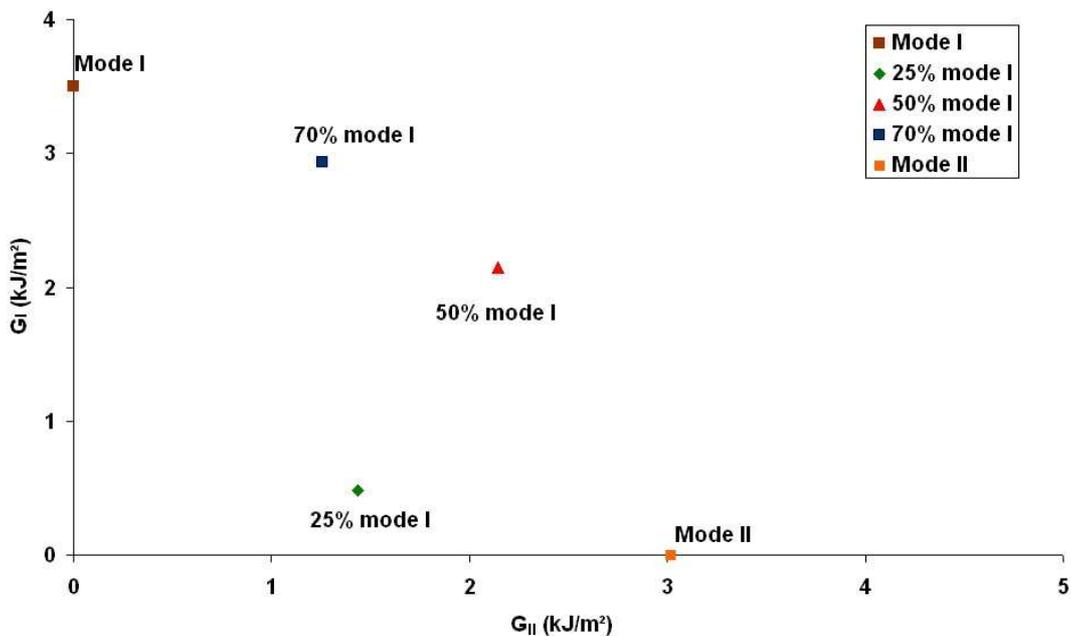


Fig. 10 : Réponse en rupture sous sollicitations de mode mixte (I+II) pour le stratifié cousu

6. Conclusions et perspectives

Ce travail est mis en place afin de déterminer l'effet de la couture sur des stratifiés composites Carbone/Epoxy. Cette étude est basée sur la détermination par des essais expérimentaux du taux de restitution d'énergie. Une campagne d'essais de mécanique de la rupture a été effectuée afin de déterminer un critère de propagation en modes I, mode II et mode mixte (I+II) des stratifiés cousus et non cousus.

L'étude du délaminage en mode I des stratifiés non cousus a été réalisée moyennant la méthode DCB. Pour les stratifiés cousus, cette méthode n'est pas adaptée car l'augmentation du taux de restitution d'énergie par la couture est telle que le coupon casse en flexion avant la propagation de la fissure. La méthode TDCB est alors choisie, l'éprouvette est renforcée en épaisseur par de l'aluminium de part et d'autre du laminé. Les essais en mode II sont réalisés par des éprouvettes ENF. En ce qui concerne le mode mixte, trois rapports de mode ont été choisis pour cette étude (25%, 50% et 70 % de mode I) et sont mis en place selon la méthode MMB.

Les résultats expérimentaux montrent que la couture améliore la tenue en mécanique de la rupture et augmente de plus de 3 fois le taux de restitution d'énergie en mode I. L'étude ENF du mode II montre que les valeurs du taux de restitution d'énergie sont plus élevées sur les stratifiés cousus. La propagation de la fissure est instable dans le cas des stratifiés non cousus. Les observations montrent une propagation stable complète de la fissure pour le cas des éprouvettes cousues mais aucune rupture de fil de couture n'a été observée dans ce cas.

Pour le cas des stratifiés non cousus, les valeurs moyennes expérimentales du taux de restitution d'énergie permettent de déduire un critère de propagation linéaire. Les résultats expérimentaux des essais MMB montrent que la couture améliore considérablement le taux de restitution d'énergie total. Néanmoins, un critère de propagation ne peut être déduit à partir de ces résultats car les essais à 25% et 50% de mode I et en mode II ne permettent pas de prendre en compte l'effet de rupture de la couture. Des études ont mis en place une nouvelle méthode sur des éprouvette de ENF renforcée en épaisseur [11] qui permettraient de déterminer des valeurs du taux de restitution d'énergie satisfaisantes et d'observer la rupture des fils de couture.

7. Références

- [1] Jain LK, Dransfield KA, Mai Y-W, « Effect of reinforcing tabs on the Mode I delamination toughness of stitched CFRPs ». *J Compos Mater*, Vol. 32, pp. 2016–26, 1998.
- [2] Wood, M.D.K., Sun, X., Tong, L., Katzos, A., Rispler, A.R., « The Effect of Stitch distribution on Mode I Delamination Toughness of Stitched Laminated Composites – Experimental Results and FEA Simulation ». *Composites Science and Technology*, Vol. 67 (6), pp. 1058-1072, 2007.
- [3] Bhavani V. Sankar, Suresh K. Sharma., « Mode II delamination toughness of stitched graphite/epoxy textile composites ». *Composites Science and Technology*, Vol. 57(7), pp. 729-737, 1997.
- [4] Rugg KL, Cox BN, Massabo R., « Mixed mode delamination of polymer composite laminates reinforced through the thickness by z-fibers ». *Composites Part A*; vol. 33, pp. 177–90, 2002.
- [5] Chen LS, Sankar BV, Ifju PG., « A new mode I fracture test for composites with translaminar reinforcements ». *Compos Sci Technol*; Vol. 62(10–11), pp. 1407–14, 2002.
- [6] Guenon V.A., Chou T.W., Gillespie J.W., « Toughness properties of a three-dimensional carbon-epoxy composite ». *J Mater Sci*, Vol. 24, pp. 4168-4175, 1989.
- [7] Prombut P, Michel L, Lachaud F, Barrau JJ., « Delamination of multidirectional composite laminates at 0/q° interface », *Engineering and Fracture Mechanics*, Vol. 73, pp. 2427-2442, 2006
- [8] Meziere Y, Michel L., Carronnier D., « Mixed-mode delamination failure criteria in carbon fibre/composite under quasi-static and cyclic loading, in Fracture of Polymers ». *Composites and Adhesives, Ed JG Williams & A Pavan,ESIS Publication Elsevier*, pp 97-110, 2000.
- [9] ASTM D5528-01, « Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites ».
- [10] ASTM D6671/D6671M-06, « Standard Test Method for Mixed Mode I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites ».
- [11] Wood, M.D.K., Sun, X., Tong, L., Luo, Q., Katzos, A., Rispler, A.R., « A New ENF Test Specimen for the Mode II Delamination Toughness Testing of Stitched Woven CFRP Laminates ». *Journal of Composite Materials*, Vol. 41 (14), pp. 1743-1772, 2007.