

Effet de l'orientation des plis sur la rupture intralaminare des stratifiés (2D) (Polyester/tissu de verre)

Mansour Rokbi^{1,2}, Abdellatif Imad², Hocine Osmani¹
Noureddine Benseddiq², Christophe Herbelot²

¹ UFAS, Laboratoire de matériaux Non Métalliques, OMP, Sétif 19000, Algérie

² Laboratoire de Mécanique de Lille, CNRS UMR 8107, Ecole Polytech'Lille, Université de Lille1, Cité Scientifique, Avenue Paul Langevin, 59 655 Villeneuve d'Ascq Cedex
email rokbiman@yahoo.fr

Résumé :

L'étude de la rupture des stratifiés fissurés n'a pas trouvé jusqu'à présent une grande extension dans la littérature. En raison de leur nature anisotrope il est difficile d'envisager entièrement leurs caractéristiques et comportement mécaniques, en particulier s'ils sont produits avec des architectures compliquées, comme dans le cas des renforts tissés. Ce travail a été réalisé pour fournir plus de détails sur l'effet de l'orientation et l'emplacement des couches sur la propagation de la fissure dans les stratifiés (2D). Les résultats montrent que l'orientation a un effet significatif sur l'amorçage et la propagation de fissure. L'amorçage et le développement de la zone d'endommagement (ZE) sont étudiés en utilisant la technique de corrélation d'image digitale (CID).

Abstract :

Rupture of laminate cracks has not been addressed to any great extent in literature. Because of their anisotropic nature it is difficult to entirely envisage their mechanical characteristics and behaviour, particularly if they are produced with complicated architectures, as in the case of the woven reinforcements. This work is designed to provide more details on the effect of the orientation and site of the layers on the propagation of the crack in the laminates (2D). The results show that the orientation has a significant effect on starting and the propagation of crack. The initialisation and the development of the zone of damage (ZE) are studied by using the technique of correlation of digital image (CID).

Mots-clefs :

Stratifiés ; Endommagement ; Propagation de fissure

1 Introduction

L'effet de l'orientation des plis sur la rupture intralaminare des composites stratifiés a fait l'objet de peu de travaux dans la littérature. Ochiai et Peters (1982) ont étudié l'endommagement de deux stratifiés en graphite époxyde $[0/\pm 45/0]_S$ et $[0/90]_{2S}$ en utilisant des éprouvettes à entaille centrale. Les résultats ont montré que la zone endommagée du stratifié $[0/\pm 45/0]_S$ s'est développée de manière imprévisible créant des séquences dans la courbe de rupture, tandis que dans le stratifié $[0/90]_{2S}$, la zone de dommage s'est développée sans interruption ayant pour résultat une courbe de rupture stable. En se basant sur le principe de la rupture globale, Gonzales et Knauss (2002) se sont intéressés au suivi de la propagation de fissure dans un fuselage stratifié $[90_2/+45_2/0_2/-45_2/0_2/+45_2/0_2/-45_2]_S$. A partir de cette configuration, deux séries d'éprouvettes sont produites. Dans la première série, la fissure est parallèle à l'orientation à 0° , alors qu'elle est perpendiculaire à cette orientation pour la seconde série. Les résultats obtenus montrent que les composantes de la contrainte transversale au fond

de fissure dans la première série sont compressives alors que pour la deuxième série, ces contraintes sont sous forme de traction avec une contribution de contrainte de cisaillement. Une analyse du processus de rupture de l'éprouvette entaillée (SENT), avec différentes séquences d'empilement et différentes morphologies de renfort, est présentée par Woo et Choi (2007). Cette étude montre que l'orientation des fibres a un effet prépondérant sur la propagation de la fissure.

Dans cette investigation, nous nous concentrons sur l'analyse de l'initiation et de la propagation de la rupture dans les composites stratifiés fissurés à renfort tissu pour différentes configurations. Une campagne d'essais est menée sur sept types de stratifiés afin de prédire l'effet de l'orientation des couches stratifiées sur l'amorçage et l'accroissement de la zone d'endommagement (ZE).

2 Matériaux et méthodes expérimentales

Les matériaux utilisés sont des composites en polyester insaturé renforcé par des tissus de verre ayant une masse surfacique de 300 g/m^2 . L'armure est constituée de fils de chaîne d'entrelacement de 13 par 25,4mm et de fils de trame d'entrelacement de 16 par 25,4mm. Le sens d'orientation du tissu de verre est choisi selon la trame (FIG. 1). Les composites stratifiés sont élaborés sous forme de plaques ($200 \times 300 \times 6,5 \text{ mm}^3$) en utilisant le processus de moulage au contact. Le découpage est effectué à l'aide d'un disque diamanté.

Sept types de stratifiés sont étudiés : les stratifiés croisés $[0]_{12}$, $[90]_{12}$ et $[0/90]_6$, les stratifiés à plis orientés $[\pm 45]_6$ et les stratifiés quasi-isotropes $[0_2/\pm 45/90_2]_s$, $[0_2/90_2/\pm 45]_s$ et $[(0/+45/90)_2]_s$.

Les éprouvettes testées sont de type de traction compact (CT) (FIG.2), d'épaisseur $B=6,5\text{mm}$ et de largeur W égale à 50mm. L'entaille est réalisée à l'aide d'une fraise scie d'épaisseur $e=0,5\text{mm}$. Pour l'ensemble des cas étudiés, la longueur de fissure initiale a_0 est fixée par le rapport a_0/W : $0,40 \leq a_0/W \leq 0,45$. Les essais mécaniques sont réalisés à l'aide d'une machine de traction universelle. La vitesse de déplacement de la traverse mobile est de 1mm/min. Les accroissements de la fissure sont mesurés à l'aide de la technique de corrélation d'image digitale (CID).

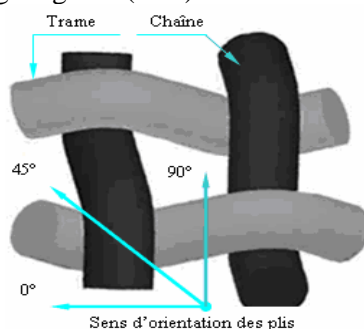


FIG. 1 – Sens d'orientation du tissu

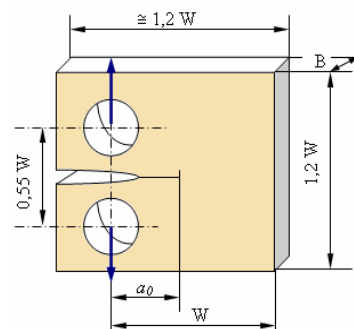


FIG. 2 – Schéma de l'éprouvette CT

3 Résultats et discussions

3.1 Analyse des courbes charge-déplacement

La figure 3 montre l'évolution de la charge en fonction du déplacement ($P-\delta$) dans le cas du stratifié $[(0/+45/90)_2]_s$. Cette courbe est caractérisée par la présence de quatre phases distinctes.

- Phase I : elle correspond à la phase linéaire élastique (OA) où aucun mécanisme d'endommagement n'est décelé par la technique de CID (FIG. 3).
- Phase II : dans la deuxième phase (AB), le fond de fissure subit un émoussement caractérisé par l'initiation de la microfissuration matricielle (FIG. 4a). La technique de CID a permis de déterminer le niveau de charge correspondant à l'initiation de la fissure (point B) du stratifié [(0/+45/90)₂]_s. Il est de l'ordre de 0,91% de la charge maximale. Il est à noter qu'à ce niveau de chargement, le renfort au voisinage du fond de fissure ne subit pas de dommage (FIG. 4b).

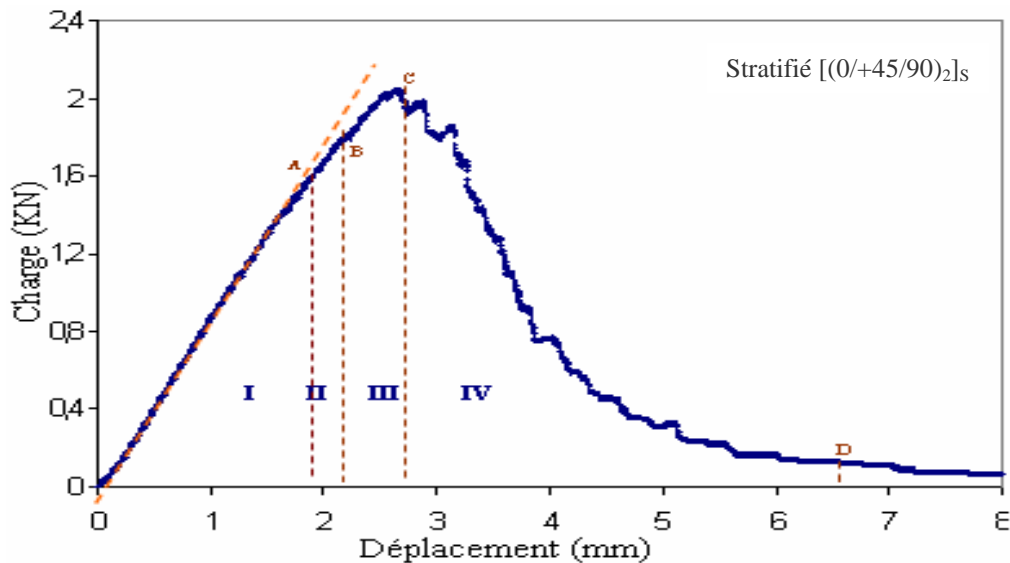


FIG. 3 – Représentation de la répartition des séquences caractérisant le processus de rupture

- Phase III : durant cette phase (BC), l'augmentation de la charge provoque la propagation de la fissure dans le matériau. Les fibres forment un pontage et tendent à arrêter l'accroissement de fissure, cela cause une redistribution des charges sur toute l'éprouvette (Fig. 4b,c). On remarque que la rupture des fibres se produit lorsque la charge maximale est atteinte (point C). Khanna et Shukla (1993), ont détaillé l'interaction entre le fond de fissure et la fibre comme suit : Quand le fond de fissure heurte la fibre, ce dernier se divise en deux puis avance lentement autour d'elle en créant une décohésion le long de sa circonférence. L'augmentation de la charge affaiblit la section de la fibre qui mène à sa rupture. Cette interaction se reproduit successivement favorisant l'accroissement de la zone endommagée.

- Phase IV : dans cette dernière phase (CD), la technique de CID montre qu'une diversité de mécanismes d'endommagement s'opèrent lors de l'accroissement de la zone d'endommagement (fissuration matricielle, pontage des fibres, délaminage et pull out) (FIG. 4d,e,f,g,h). Rokbi (2001) et Rokbi et Osmani (2003) ont présenté une étude plus détaillée sur cette phase. Les auteurs signalent que l'augmentation du vide (zone blanchâtre sur la figure 4d) tend à affaiblir la matrice en donnant naissance à une déformation du fond de fissure par déchirement. De plus, la vitesse du processus de rupture semble réduire le pull out. Par conséquent, la rupture est favorisée par les contraintes de cisaillement.

Les différents niveaux de charges déterminés à partir d'une combinaison des valeurs obtenues par l'essai de rupture (courbe (P- δ)) et par les photos réalisées par la technique de CID, sont illustrés par le tableau 1.

Matériaux	Charge (KN)		
	émoussement (point A)	amorçage (point B)	maximale (point C)
$[(0/+45/90)_2]_S$	1,4635	1,8452	2,0349
$[0_2/\pm 45/90_2]_S$	1,4790	1,7882	2,0438
$[90]_{12}$	1,3474	1,6105	2,1378
$[0/90]_6$	1,2461	1,4607	1,9533
$[0_2/90_2/\pm 45]_S$	1,2665	1,5064	1,8002
$[\pm 45]_6$	0,9736	1,3552	1,7764
$[0]_{12}$	0,9486	1,1523	1,4038

Tableau 1 : Niveaux de charges remarquables des différents stratifiés étudiés

Gonzales et Knauss (2002) constatent que l'amorçage des endommagements dans les stratifiés est toujours observé au sein des couches intérieures du matériau plutôt que sur la surface. Selon cette constatation, on peut conclure que le confinement des couches à 90° à l'intérieur des stratifiés quasi-isotropes est l'une des raisons de la résistance de tels matériaux.

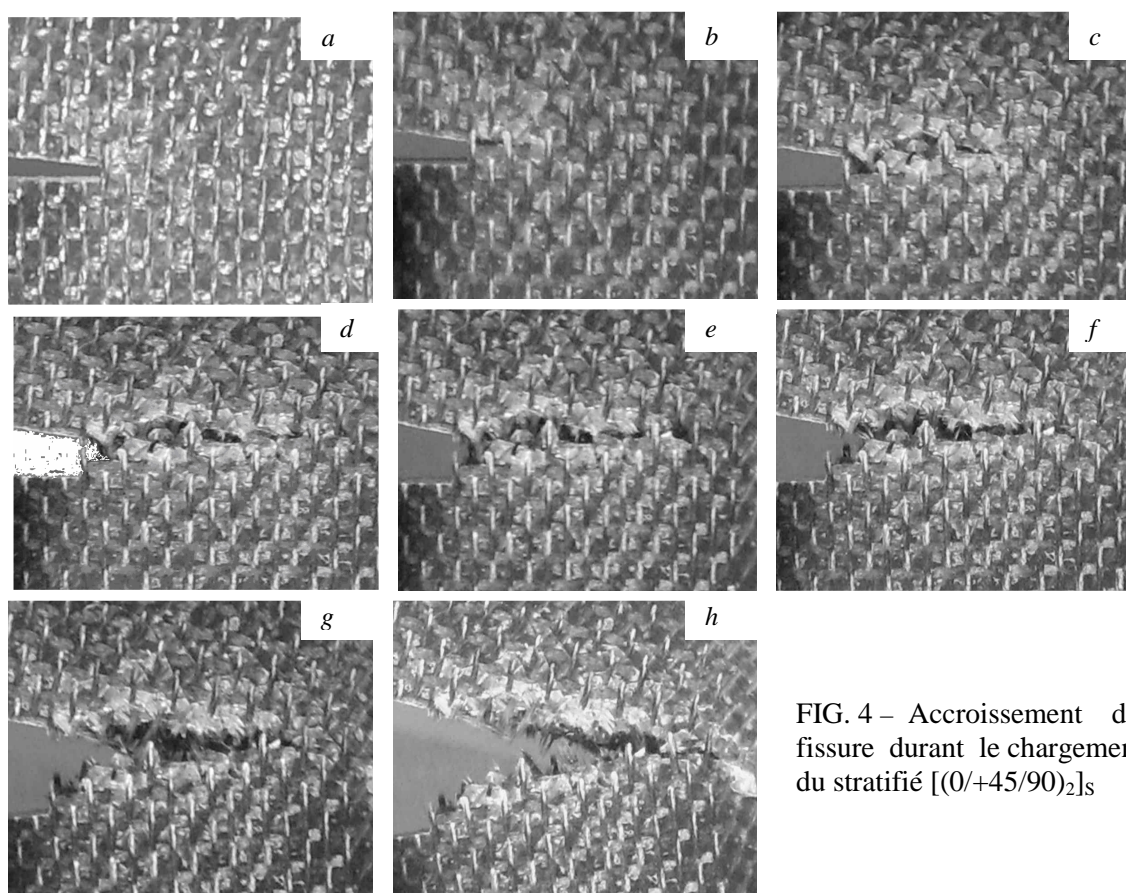


FIG. 4 – Accroissement de fissure durant le chargement du stratifié $[(0/+45/90)_2]_S$

La superposition des courbes charge-évolution de la zone d'endommagement des stratifiés étudiés (FIG. 5), montre que le matériau $[90]_{12}$ enregistre la charge de rupture la plus élevée. Pour ce niveau de charge, la technique de CID a détecté un accroissement de fissure (Δa_{rup}) égal à 1,36mm. Les matériaux $[0_2/\pm 45/90_2]_S$ et $[(0/+45/90)_2]_S$ ont la même charge de rupture mais les accroissements (Δa_{rup}) sont différents, et sont respectivement de 1,13mm et 0,60mm. Les stratifiés $[0_2/90_2/\pm 45]_S$ et $[\pm 45]_6$ se caractérisent par le même accroissement (Δa_{rup}), soit 1,52mm, mais les charges de rupture sont distinctes. Le plus grand accroissement (Δa_{rup}) enregistré est relatif au stratifié $[0/90]_6$. Il est égal à 2,61mm.

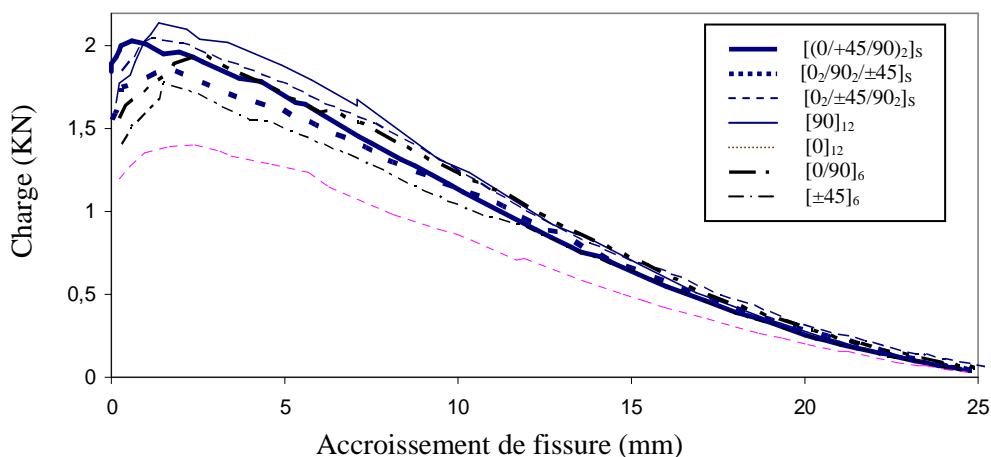


FIG. 5 – Evolution de la charge en fonction de l'accroissement de fissure des stratifiés étudiés

Les résultats montrent que la rupture des stratifiés se distingue d'un matériau à l'autre par le niveau de charge, la durée de rupture et les mécanismes d'endommagement. L'agrandissement de la zone d'amorçage de la fissure (FIG. 6), nous permet de classifier les dommages en 3 types.

Dans le premier type d'endommagement, on assiste à une extraction des torons de fibres lors de l'initiation de la fissure. Les fibres se rompent ensuite à des longueurs différentes jusqu'à la rupture finale des torons (FIG. 6a). Au fur et à mesure que la fissure progresse, seules les contraintes de cisaillement dominent la zone (ZE). On observe également un délaminage entre les couches à 90° et/ou 0° (cas $[0/90]_6$). Ce dernier semble s'amortir avec toute propagation ultérieure de la fissure. Ce type d'endommagement caractérise les stratifiés croisés.

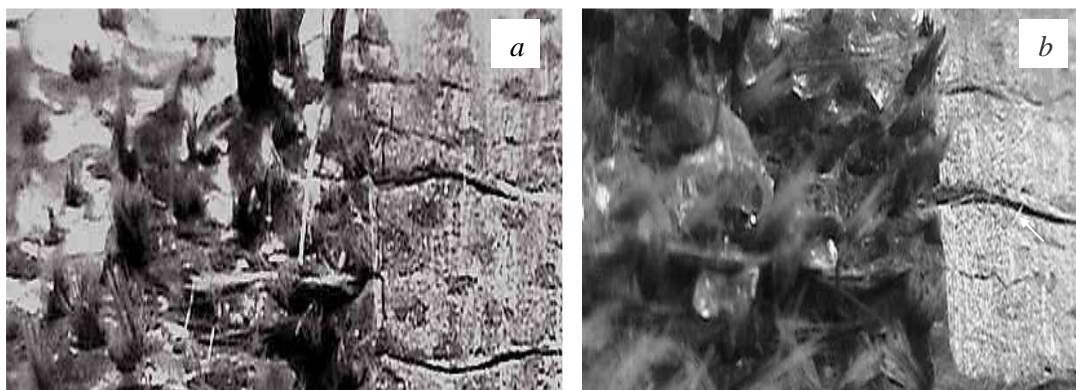


FIG. 6 – Faciès de rupture des stratifiés a) $[90]_{12}$ et b) $[(0/+45/90)_2]_S$

Dans le deuxième type d'endommagement, la zone (ZE) du stratifié $[\pm 45]_6$ semble être exposée à un cisaillement couplé à un pull out juste au démarrage de la rupture, puis, seul le pull out demeure le phénomène marquant. Les torons se rompent au même endroit en donnant naissance à des mèches (FIG. 6b). Aucun délaminage n'a été observé dans ce cas.

Le mixage des deux types précédents conduit à un mode d'endommagement compliqué. Dans ce dernier, La zone (ZE) est caractérisée par un cisaillement au niveau des plis à 0° et à 90° plus un pull out au niveau des plis à 45° . Ce troisième type d'endommagement semble définir les mécanismes relatifs aux stratifiés quasi-isotropes (FIG. 6b). Cette même photographie montre un délaminage entre les couches à 90° et celles à 45° . Ce dernier est observé même loin de la zone d'amorçage de fissure.

4 Conclusions

L'étude des stratifiés fissurés avec différentes configurations d'empilement montre que l'orientation des plis a un effet majeur sur l'amorçage ainsi que sur la propagation de la fissure. La technique de corrélation d'image digitale semble être un outil appréciable pour la détection des diverses étapes d'endommagement des stratifiés. Ces dernières se résument à un émoussement du fond de fissure suivi par un amorçage de la fissure puis le début de divers mécanismes d'endommagement. Les résultats montrent que le confinement des plis à 90° à l'intérieur des composites stratifiés assure une bonne rigidité et une résistance appréciable à l'initiation ainsi à l'accroissement de la zone de dommage (cas des stratifiés $[0_2/\pm 45/90_2]_s$, $[(0/+45/90)_2]_s$, $[90]_{12}$ et $[0/90]_6$).

Références

- González, L. & Knauss, W.G. 2002 Scaling global fracture behavior of structures-sized laminated composites. *Int. J. Frac.* **118**, 363–394
- Khanna, S.K. & Shukla, A. 1993 Energy absorption mechanisms during dynamic fracturing of fibre-reinforced composites. *J. Mater. Sci.* **28**, 3722-3730.
- Ochiai, S. & Peters, P.W.M. 1982 Tensile of centre-notched angle ply $(0/\pm 45/0)_s$ and $(0/90)_{2s}$ graphite - epoxy composites. *J. Mater. Sci.* **17**, 417-428
- Rokbi, M. & Osmani, H. 2003 Contrôle simultané de l'extension de la zone endommagée (Mode I) de la matrice polyester renforcée par des fibres de verre. 16^{ème} Congrès Français de Mécanique. 6P, Nice.
- Rokbi, M. 2001 Comportement à la rupture et caractérisation mécanique de composites Polyester/fibres de verre. Thèse de magister. 141P, Uni.M'sila, Algérie.
- Woo, S.C. & Choi, N.S. 2007 Analysis of fracture process in single-edge-notched laminated composites based on the high amplitude acoustic emission events. *Compos. Sci. Technol.* **67**, 1451–1458