

# MODELISATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT EN RUPTURE D'UN COMPOSITE MULTICOUCHE

R. Malfi, M. Belhouari, B. Bachir Bouiadjra et T. Achour

Université Djilalli Liabes de Sidi Bel Abbés, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département de Génie Mécanique BP 98 Cité Ben M'Hidi Sidi Bel Abbés 22000, Algérie  
Tél.: 0021348544100  
Fax : 0021348544100  
Email : ra\_malfi@yahoo.fr

## 1. Introduction

Les multicouches composites nécessitent une étude particulière car ils ont la particularité d'être constitués de plusieurs matériaux orthotropes. Leur résistance mécanique pose des problèmes spécifiques, en particulier, la différence des propriétés physiques engendre la création de contraintes résiduelles au voisinage de l'interface. Ces contraintes peuvent conduire, à la fragilisation du multicouche au niveau de l'interface ou à l'endommagement de cette dernière, et elles présentent aussi le risque de création de microfissures dans les matériaux en présence, produisant la rupture de l'assemblage. Plusieurs travaux analytiques [1-3], numériques [4-10] et même expérimentaux [11] ont été conduits pour étudier le comportement des fissures situées à l'interface d'un bimatériau de constituants anisotropes. Ils ont montré que le champ de contraintes est oscillatoire en pointe de fissure, comme pour le cas d'une fissure interfaciale entre deux milieux isotropes. Sun et Jih [6] et Sun et Manoharan [7] ont montré analytiquement et numériquement par la méthodes des éléments finis que les champs des contraintes et déplacements en pointe de fissure interfaciale sont oscillatoires dans un bimatériau dont les constituants sont isotropes et orthotropes. En se basant sur les travaux de ces auteurs ; Hwu and Hu [8] et Hwu [9] ont montré que le facteur d'intensité de contraintes d'une fissure interfaciale entre deux matériaux anisotropes est de nature complexe. Pour supprimer la nature oscillante de la singularité en pointe de fissure ; Raju et al [10] ont suggéré l'utilisation d'une couche mince homogène placée le long de l'interface pour contenir la fissure. Kim et Mal [12] ont montré que le niveau et la distribution des contraintes changent considérablement et dépendent de l'ordre de plis, de leur nombre, de leurs orientations, de leurs épaisseurs, des propriétés des constituants et de la nature du chargement. D'autres études [13-17] ont confirmé ces constatations en montrant que le facteur d'intensité de contraintes et l'énergie de rupture en pointe de fissure interfaciale dépend des mêmes paramètres.

Cette étude porte sur le comportement en rupture d'un multicouche dont les constituants ont un comportement orthotrope élastique. L'approche énergétique de la mécanique linéaire de la rupture fondée sur le taux de restitution d'énergie est utilisée pour décrire le comportement en rupture du multicouche. Nous mettons en évidence l'effet de l'orientation des plis, les propriétés mécaniques de l'adhésif ainsi que le nombre de couches sur la variation de l'énergie de rupture en pointe de fissure.

## 2. Résultats

### 2.1. Effet de l'orientation des plis

Considérons un multicouche constitué par deux matériaux orthotropes collés par un adhésif. Le modèle géométrique choisi est une poutre encadrée de longueur  $L$ , de largeur  $W$  et d'épaisseur  $B$ , telles que :  $W/L=0,25$  ;  $B/W=0,4$  et  $B/L=0,1$ . Les deux matériaux 1 et 2 sont caractérisés respectivement par leurs largeurs  $W_1$  et  $W_2$  ; avec  $W_1/W = W_2/W = 0,4$ . La poutre est sollicitée mécaniquement en traction suivant l'axe  $(y)$ , ( $x/L = 0,1$ ), son intensité est  $\sigma_0 = 70$  MPa. Le multicouche est constitué par deux matériaux orthotropes de même largeur ( $W_1/L = W_2/L = 0,1$ ). Les deux matériaux sont collés par un adhésif de module de cisaillement  $G_a = 1,092$  GPa ; de coefficient de Poisson  $\nu_a = 0,3$  et de largeur  $W_a$  ( $W_a/L = 0,05$ ). Les propriétés mécaniques du composite à fibres orientées à  $0^\circ$  sont données sur le tableau 1 Une fissure interfaciale de taille  $(a)$  se trouve à l'interface du matériau 1 et de l'adhésif (Fig.1). La structure est modélisée par des éléments isoparamétriques quadratiques à huit nœuds (Fig. 2). La singularité en pointe de fissure est modélisée par des éléments spéciaux du type  $1/4$  point.

Propriétés	Valeurs
Longitudinal $E_1$ (MPa)	128800
Transversal $E_2$ (MPa)	11200
Transversal $E_3$ (MPa)	11200
$G_{12}$ (MPa)	6650
$\nu_1$	0.29
$\nu_2$	0.29
$\nu_3$	0.29

Tableau 1: Propriétés mécaniques du composite.

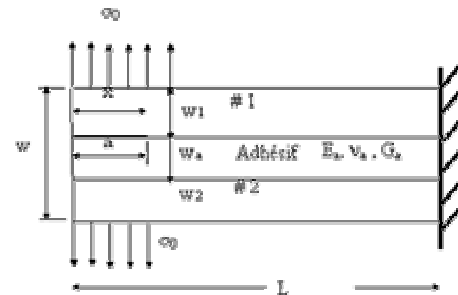


Figure 1 : Modèle géométrique de la poutre.

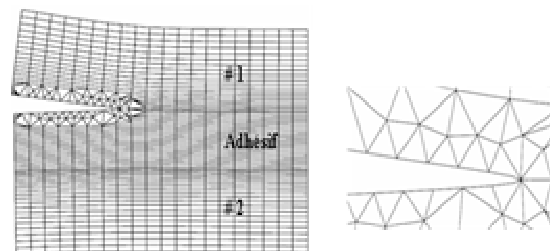


Figure 2 : Maillage de la plaque et du voisinage de la fissure.

Les résultats obtenus numériquement par la méthode des éléments finis sont représentés sur la figure 3. Cette dernière illustre la variation de l'énergie de rupture

interfaciale en fonction de la longueur de fissure normalisée  $a/L$ , pour différentes orientations des plis du matériau 1 et 2 constituant le multicouche. Cette énergie est définie en fonction des facteurs d'intensité de contraintes  $K_1$  et  $K_2$  par la relation suivante :

$$G = \frac{1}{2} \frac{E_1 + E_2}{\cosh^2(\pi \varepsilon)} (K_1^2 + K_2^2)$$

Où :  $\varepsilon$  est la constante biélastique, définie par :

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{1-\beta}{1+\beta} \right) \quad \text{avec :} \quad \beta = \frac{1}{2} \frac{\mu_1(1-2\nu_2) - \mu_2(1-2\nu_1)}{\mu_1(1-\nu_2) + \mu_2(1-\nu_1)}$$

l'énergie de rupture interfaciale est normalisée par :

$$G_0 = \frac{\sigma_0^2 \pi a}{E_1}$$

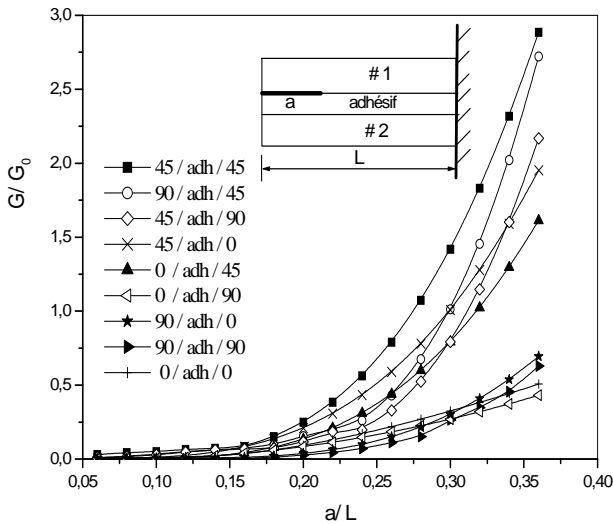


Figure 3 : Variation de  $G/G_0$  en fonction de  $a/L$ .

Nous observons que l'énergie de rupture interfaciale évolue proportionnellement avec l'augmentation de la longueur de fissure. Pour les faibles tailles de fissures  $a/L < 0,2$ , nous observons que le niveau de cette énergie est faible. Au-delà du rapport  $a/L=0,2$ ; le rapport  $G/G_0$  croît rapidement avec la longueur de la fissure. Pour les faibles tailles de fissure  $a/L < 0,2$ , on remarque que quelle que soit l'orientation des plis des deux matériaux 1 et 2 et leurs positions, les valeurs du taux de restitution d'énergie normalisé  $G/G_0$  sont presque constantes. L'effet de l'orientation des plis sur la variation du paramètre  $G/G_0$  apparaît lorsque la longueur de la fissure normalisée  $a/L$  dépasse 0,2 ; nous constatons que le rapport  $G/G_0$  croît rapidement lorsque les plis des deux matériaux ou l'un des deux sont orientées d'un angle de  $45^\circ$  [12, 13]. Pour les autres orientations (0 et  $90^\circ$ ), on observe que quelle que soit la taille de la fissure, son énergie de rupture est presque constante [12, 13]. D'autre part, la position des deux matériaux n'a pas une grande influence sur le niveau de l'énergie de rupture. C'est-à-dire lorsque les matériaux sont inversés, on observe que les valeurs du paramètre  $G/G_0$  sont presque identiques. Ce phénomène est plus marqué pour des fissures de faibles tailles. Nous notons cependant que l'effet du changement de la position des deux matériaux apparaît seulement pour les longueurs de fissures élevées et pour une orientation des plis de  $45^\circ$ .

Dans ce cas, nous notons un écart moyen entre les valeurs du rapport  $G/G_0$  de l'ordre de 20% pour un rapport  $a/L=0,36$ . Cet écart est presque nul pour des fissures de faibles tailles ( $a/L \leq 0,15$ ).

## 2.2. Effet des propriétés de l'adhésif

L'effet du module de cisaillement de l'adhésif sur la valeur de l'énergie de rupture interfaciale est montré sur la figure 4. Cette dernière illustre la variation de l'énergie de rupture en pointe de fissure en fonction du module de cisaillement de l'adhésif  $G_a$  et pour deux tailles de fissure normalisées  $a/L=0,05$  et  $a/L=0,35$ . La fissure est initiée à l'interface adhésif/matériau 1. Cette analyse porte sur un multicouche dont l'orientation des plis des deux constituants est de  $0^\circ$ .

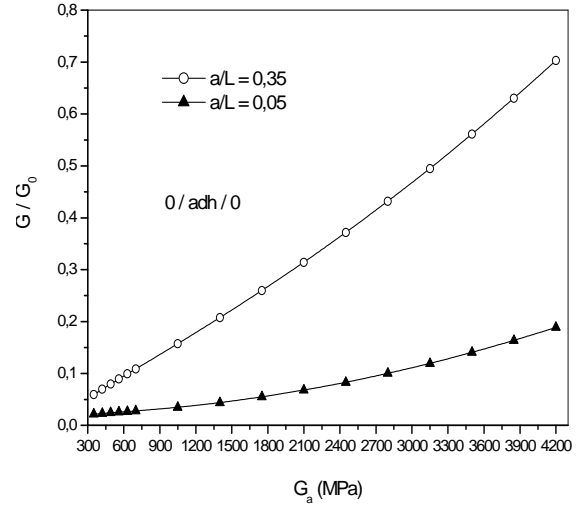


Figure 4: Variation de  $G/G_0$  en fonction du module de cisaillement  $G_a$ .

Nous remarquons que les valeurs les plus importantes du paramètre  $G/G_0$  sont obtenues pour des longueurs de fissure élevées et pour un module de cisaillement de l'adhésif  $G_a$  élevé. En effet, une augmentation de ce module entraîne un accroissement de l'énergie de rupture en pointe de fissure. Dans ce cas, les propriétés mécaniques de l'adhésif augmentent en entraînant une augmentation des valeurs du rapport  $G/G_0$  [18]. Cependant, un adhésif de propriétés mécaniques élevées n'assure pas une bonne adhésion. Des microfissures apparaissent dans le volume de l'adhésif ou à l'interface ; ces microfissures peuvent conduire à la rupture brutale de la jonction. Une optimisation de l'adhésif est donc recommandée. Pour les faibles modules de cisaillement de l'adhésif, nous observons que le niveau l'énergie de rupture en pointe de fissure est faible. Par conséquent, un adhésif de faible module de cisaillement assure une bonne adhésion des deux matériaux [18]. Au-delà du module  $G_a=1000$  MPa ; le paramètre  $G/G_0$  croît rapidement avec le module de cisaillement  $G_a$ , cet effet est plus clair lorsque la longueur de la fissure augmente.

## 2.3. Effet du nombre de couches

Considérons un multimatériau constitué de quatre couches collées par un adhésif de module de cisaillement  $G_a = 1,092$  GPa et de coefficient de Poisson  $\nu_a = 0,3$ . Les largeurs  $W_1$  et  $W_2$  des deux matériaux sont divisées en deux couches collées par le même adhésif. Nous supposons l'existence d'une fissure de longueur ( $a$ ) située à l'interface

matériau 1/adhésif. Celle-ci se propage le long de cette interface. Nous avons illustré sur la figure 5 les variations du taux de restitution d'énergie normalisé  $G/G_0$  en fonction de la longueur de fissure normalisée  $a/L$ . Cette figure confirme les résultats de la figure 3. En effet, nous remarquons que les valeurs les plus importantes de l'énergie de rupture interfaciale sont obtenues pour une orientation des plis de  $45^\circ$  et pour des fissures de longueurs élevées. Pour les faibles tailles de fissure  $a/L < 0,1$  on remarque que les valeurs du taux de restitution d'énergie normalisé  $G/G_0$  sont presque constantes quelle que soit l'orientation des plis [19]. Nos résultats montrent clairement que la valeur du rapport  $G/G_0$  dépend de l'orientation des plis. En effet, si nous comparons les valeurs du paramètre  $G/G_0$  pour une orientation des plis de  $45^\circ$  et  $90^\circ$  nous enregistrerions un écart de l'ordre de 80 % lorsque la fissure tend vers la mi-largeur de la jonction ( $a/L=0,5$ ). Cet écart augmente à 90 % pour les orientations de  $45^\circ$  et  $0^\circ$ . L'écart constaté entre les valeurs du rapport  $G/G_0$  chute à 60 % pour les autres orientations des plis ( $0^\circ$  et  $90^\circ$ ).

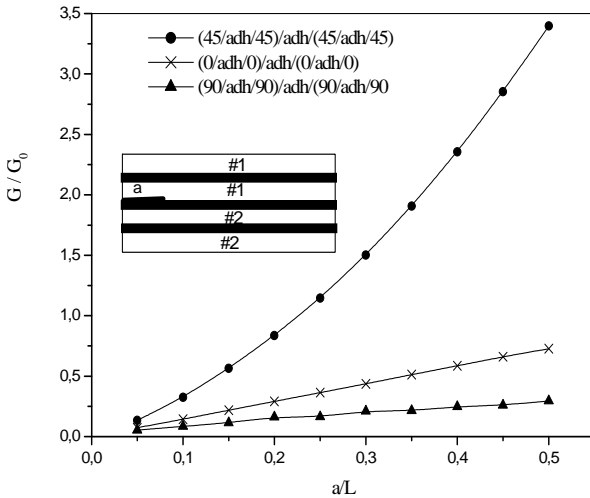


Figure 5: Variation de  $G/G_0$  en fonction de  $a/L$ .

### 3. Conclusion

Le niveau d'énergie de rupture interfaciale dans un multicouche constitué de matériaux orthotropes varie avec : la taille de la fissure, l'orientation des plis, les propriétés mécaniques de l'adhésif et le nombre de couches. Une orientation des plis de  $45^\circ$  conduit à des niveaux d'énergie élevés. Cet effet est plus marqué lorsque la taille de fissure augmente. L'augmentation des propriétés mécaniques de l'adhésif entraîne un accroissement de l'énergie de rupture en pointe de fissure.

### Références

[1] R.C. Alderliesten Analytical prediction model for fatigue crack propagation and delamination growth in Glare International Journal of Fatigue 29 (2007) 628–646  
 [2] A. Carpinteri , M. Paggi. Analytical study of the singularities arising at multi-material interfaces in 2D linear elastic problems. Engineering Fracture Mechanics 74 (2007) 59–74

[3] Barroso A, Manticó V, Parí's F. Singularity analysis of anisotropic multimaterial corners. Int J Fract 2003;119:1–23.  
 [4] Carpinteri A, Paggi M, Pugno N. Numerical evaluation of generalized stress-intensity factors in multi-layered composites. Int J Solids Struct 2006;43:627–41.  
 [5] A. Szekrényes. Delamination fracture analysis in the  $G_{II}$ – $G_{III}$  plane using prestressed transparent composite beams International Journal of Solids and Structures 44 (2007) 3359–3378  
 [6] Sun CT, Jih CJ. On strain energy release rates for interfacial cracks in bi-material media. Engng Fract Mech 1987;28(1):13–20.  
 [7] Sun CT, Manoharan MG. Strain energy release rates of an interfacial crack between two orthotropic solids. J Compos Mater 1989;23:460–78.  
 [8] Hwu C, Hu JS. Stress intensity factors and strain energy release rates of delaminations in composite laminates. Engng Fract Mech 1992;42(6):977–88.  
 [9] Hwu C. Fracture parameters for anisotropic bi-material interface cracks. Engng Fract Mech 1993;45(1):89–97.  
 [10] Raju IS, Crews Jr JH, Aminpour MA. Convergence of strain energy release rate components for edge delaminated composite laminates. Engng Fract Mech 1988;30(3):383–96.  
 [11] C.R. Chen, J. Pascual , F.D. Fischer, O. Kolednik , R. Danzer Prediction of the fracture toughness of a ceramic multilayer composite – Modeling and experiments Acta Materialia 55 (2007) 409–421  
 [12] J. K. Kim & Y.W. Ma1. Elsevier Science Ltd, The Boulevard, Langford Lane Kidlington, Oxford OX5 1GB, U.K. First edition 1998  
 [13] Marsden WM, Guild FJ, Ogin SL, Smith PA. Modelling stiffness damage behaviour of  $(\pm 45/90)_s$  and  $(90/\pm 45)_s$  glass fibre reinforced polymer laminates. Plastic, Rubber Compos 1999;28(1):30–9.  
 [14] Varna J, Joffe R, Akshantala NV, Talreja R. Damage in composite laminates with off-axis plies. Compos Sci Technol 1999;59(14): 2139–47.  
 [15] Kashtalyan M, Soutis C. Strain energy release rate for off-axis ply cracking in laminated composites. Int J Fract 2001;112(2):L3–8.  
 [16] A.M. Zenkour Analytical solution for bending of cross-ply laminated plates under thermo-mechanical loading Composite Structures 65 (2004) 367–379  
 [17] P. Prombut , L. Michel , F. Lachaud , J.J. Barrau. Delamination of multidirectional composite laminates at  $0^\circ/\theta^\circ$  ply interfaces Engineering Fracture Mechanics 73 (2006) 2427–2442  
 [18] Li S, Thouless MD, Waas AM, Schroeder JA, Zavattieri PD. Mixed-mode cohesive-zone models for fracture of an adhesively bonded polymer–matrix composite. Engng Fract Mech 2006;73(1):64–78.  
 [19] B. Tekeyeh-Marouf, R. Bagheri Fracture behavior of multi-layered composites under impact loading. Materials Science and Engineering A 448 (2007) 20–24