

Analyse par éléments finistridimensionnelle du délaminage des structures en composites stratifiées

A.Bouakkaz, R. Amiri, A.Amiri, et M.Belhouari.

Département de génie mécanique, Faculté de Technologie, Université de Sidi Bel Abbès, BP 89 Cité ben M'Hidi Sidi Bel Abbès 22000, E-mail : bouakkaz.ahmedo@gmail.com

Résumé—Le délaminage est l'un des endommagements les plus critiques en terme de tenue mécanique des structures en composites stratifiés. Notre travail s'inscrit dans ce contexte il a pour objet l'étude du délaminage des structures en composite stratifié. L'approche globale de la mécanique de la rupture basée sur le taux de restitution d'énergie est utilisée comme critère de rupture. L'éprouvette DCB est modélisée par la MEF en 3D pour déterminer le taux de restitution d'énergie en mode I. Nous avons mis en évidence l'effet de la taille de fissure et sa position dans les interfaces ainsi que l'orientation des plis du composite sur la variation de l'énergie de rupture en pointe de fissure. Les principaux résultats montrent que l'énergie de rupture en pointe de fissure sollicitée en mode I est directement liée à la taille de fissure, à sa position dans les interfaces des différentes couches du composite stratifié et à l'orientation des plis. L'effet de ces différents paramètres apparaît lorsque la taille de fissure dépasse sa valeur critique.

Mots-clés — Fissure ; Délaminage ; Composite stratifié, taux de restitution d'énergie ; Interface

I. INTRODUCTION

Les composites stratifiés sont largement utilisés dans les domaines de haute technologie tels que l'ingénierie aérospatiale et aéronautique, l'ingénierie automobile et de la technologie marine. Toutes les structures composites, ayant toutefois soigneusement subi un processus de fabrication, sont prédisposées à contenir certains types de défauts. Ces défauts peuvent également se développer dans les structures composites pendant leur état de service. La présence de ces défauts au voisinage de l'interface constitue une source d'amorçage de fissures et de concentration de contraintes pouvant conduire à l'endommagement ou à la rupture du composite.

Le mode d'ouverture est le mode de délaminage le plus critique parce qu'il nécessite le moins d'énergie. Parmi les essais en mode I, la configuration la plus répandue est l'essai DCB (Double Cantilever Beam) [1-5]. Le délaminage initial est créé par un défaut artificiel, généralement un insert non-adhésif d'épaisseur de moins de 13 μm [6]. L'insert est placé entre les plis médians du stratifié. Les dispositifs d'introduction de charge, par charnières ou par blocs, sont fixés à l'extrémité de l'éprouvette ayant ce délaminage initial. Le chargement est appliqué dans la direction de l'épaisseur de l'éprouvette par l'intermédiaire de ces dispositifs. Les stratifiés avec les plis non-unidirectionnels autour de l'insert présentent un problème de changement du plan de délaminage dans l'essai DCB. Par conséquent, le stratifié unidirectionnel UD est le plus couramment utilisé pour cet essai. Cependant, l'interpénétration des fibres entre les plis adjacents dans une éprouvette de type UD a tendance à créer des ponts entre les deux lèvres de l'éprouvette pendant que la fissure avance [7-9].

Cette étude porte sur l'analyse par la méthode des éléments finis tridimensionnelle du délaminage d'un composite stratifié en mode I.

II. METHODOLOGIE

Le modèle géométrique (mode I) de l'éprouvette DCB (Double Cantilever Beam) en composite boron-époxy est représenté sur la figure 1. Le composite stratifié est composé de 4 plis, chacun d'eux a une épaisseur de 0.26 mm, avec une orientation initiale des fibres de ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ$). L'éprouvette DCB est de 140 mm de longueur, 40 mm de largeur et 1.04 mm d'épaisseur. L'éprouvette est soumise à un chargement de traction d'amplitude 50 MPa. Ce chargement conduit à un mode ouverture pur de la fissure. La charge est appliquée sur une tranche suivant la largeur et à une distance de 1.4 mm de son extrémité libre comme indiqué sur la figure 1.



Fig. 1. Modèle géométrique de l'éprouvette DCB.

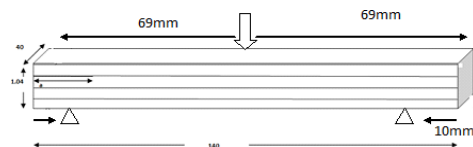


Fig.2. Eprouvette de flexion 3 points.

Nous supposons l'existence d'une fissure de longueur (a) située à différents interfaces suivant la longueur de l'éprouvette. La fissure se propage le long de l'interface afin de simuler le comportement du délaminage du composite stratifié en mode I.

La structure étant modélisée par des éléments cubiques (hexaèdres) à huit nœuds. Le maillage de l'éprouvette utilisée dans le modèle en 3D des éléments finis est représenté sur la figure 3a et 3b. Un maillage régulier est effectué pour toute la structure. Ce maillage reste le même tout au long du calcul afin d'éviter toute influence du maillage sur les résultats. La fissure débouchant à l'extrémité de l'éprouvette entraîne une singularité géométrique provoquant une concentration de contrainte. Par conséquent, un maillage raffiné est effectué autour de la fissure.

Le délaminage est créé suivant la largeur du matériau composite et il se trouve entre couches de composite stratifié. Ce délaminage est simulé par une fissure interfaciale entre deux couches voisines. Cette interface est supposée parfaite sans défauts et sans contact frottant. Les propriétés mécaniques du composite bore/époxy à l'orientation 0° sont illustrées sur le tableau 1. Ces propriétés changent avec l'orientation de chaque pli. Chaque couche du composite est supposée suivre un comportement linéaire élastique orthotrope. Le logiciel de la simulation numérique utilisé dans cette étude est le code d'éléments finis ABAQUS [10] pour analyser la propagation de la fissure du délaminage.

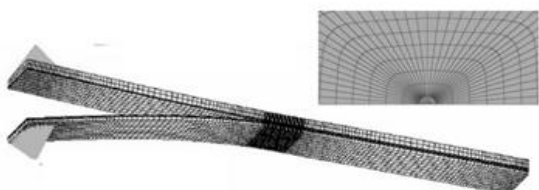


Fig. 3 a. Maillages de l'éprouvette DCB et du voisinage de la fissure.

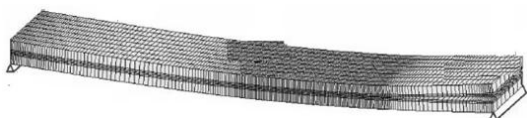


Fig. 3 b. Maillages de l'éprouvette flexion 3 points.

Tableau 1 : Propriétés mécaniques du composite bore/époxy unidirectionnel.

Fraction volumique (%)	0.5
E_{11} (MPa)	207000
E_{22} (MPa)	21000
E_{33} (MPa)	21000
G_{12} (MPa)	7710
G_{13} (MPa)	7710
G_{23} (MPa)	7230
ν_{12}	0,294
ν_{13}	0,294
ν_{23}	0,452

III. RESULTATS ET ANALYSE

III.1. Délaminage en mode I

La figure 4 illustre l'effet de la position de la fissure dans les interfaces sur la variation du taux de restitution d'énergie. Le composite stratifié est composé de quatre plis. La première couche est orientée de 90° , la deuxième est de 0° la troisième et la quatrième sont orientées respectivement de -45° et 45° . L'objectif de cette analyse est de repérer, la position de la fissure qui engendre les valeurs de l'énergie de rupture en pointe de fissure les plus élevées. Ainsi, le choix des orientations des plis du composite est arbitraire.

Le taux de restitution d'énergie est déterminé par la méthode VCCT (Virtual Crack Closure Technique). Cette méthode qui se base sur la mécanique élastique linéaire de

la rupture et dont le principe consiste à calculer l'énergie nécessaire pour refermer une fissure d'une longueur 'a' en supposant que cette dernière est égale à l'énergie permettant d'ouvrir cette fissure.

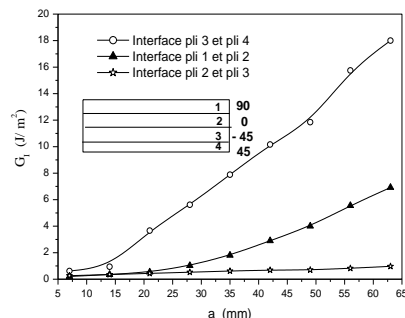


Fig.4. Effet de la position de la fissure sur la variation du taux de restitution d'énergie G_I .

Ainsi, l'énergie de rupture en pointe de fissure interfaciale évolue proportionnellement avec l'augmentation de la longueur de fissure. Pour les faibles tailles de fissures, le niveau de cette énergie est faible. Ceci est dû au faible champ de contraintes en pointe de fissure ; ces dernières sont directement liées au paramètre de rupture G_I . Le niveau de ce paramètre dépend de la position de la fissure dans l'interface. En effet, les valeurs du taux de restitution d'énergie les plus élevées sont obtenues pour une fissure située entre le pli 3 et le pli 4. Pour les faibles longueurs de fissure $a \leq 15$ mm, le paramètre de rupture G_I est presque constant. Au-delà de 15 mm, ce paramètre de rupture croît rapidement avec la longueur de la fissure. L'effet de la position de la fissure entre les plis 1/2 et 2/3 apparaît lorsque la longueur de la fissure dépasse 25 mm. Dans le cas de fissures inférieures à cette taille, les niveaux des énergies de rupture sont presque constants. En comparant les énergies de rupture en pointe de fissure aux interfaces 1/2 et 2/3, nous observons que ces énergies croissent de presque 90 % lorsque le délaminage atteint quasiment la moitié de l'éprouvette.

Les résultats obtenus montrent clairement que la position de la fissure a une grande influence sur les énergies de ruptures en pointe de fissure. En effet, les valeurs les plus élevées de ces énergies sont obtenues aux interfaces 3/4 et 1/2. Ceci peut être dû au fait que ces deux interfaces sont près des bords inférieur et supérieur de l'éprouvette ou est appliqué directement le chargement de traction provoquant l'ouverture de la fissure. La position médiane de l'interface 2/3 conduit à des niveaux des énergies de rupture les plus faibles, voire négligeables devant les autres énergies de rupture. Plusieurs travaux [11-13] menés sur l'étude de la propagation du délaminage, ont montrés que les faibles valeurs du taux de restitution d'énergie est obtenu sur des éprouvettes dont l'interface délaminante qui se situent entre des plis d'orientation à 0° . Le taux de restitution d'énergie déterminé pour ce type d'interface étant normalement la valeur la plus faible des énergies critiques, son utilisation dans les critères de propagation de délaminage permet d'obtenir une marge de sécurité suffisante pour le dimensionnement des structures composites.

L'effet de l'orientation des plis du composite est illustré sur la figure 5; celle-ci montre la variation du taux de restitution d'énergie en pointe de fissure à l'interface 2/3. Une orientation de 0° et dans la direction perpendiculaire au chargement.

Pour les tailles de fissure $a \leq 20$ mm, on remarque que quelle que soit l'orientation des plis de chaque couche, les valeurs du taux de restitution d'énergie G_I sont presque constantes. L'effet de l'orientation des plis sur la variation du paramètre G_I apparaît lorsque la longueur de la fissure dépasse les 20 mm où l'énergie de rupture en sa pointe croît rapidement. Cet effet est plus marqué lorsque le pli 1 est orienté de 0° . Dans ce cas, l'énergie de rupture atteint sa valeur maximale. Par contre, une orientation d'un angle de 90° de ce pli conduit à un niveau d'énergie le plus faible. Dans ce cas, la direction des plis est parallèle au chargement. Les autres orientations engendrent des niveaux des énergies intermédiaires.

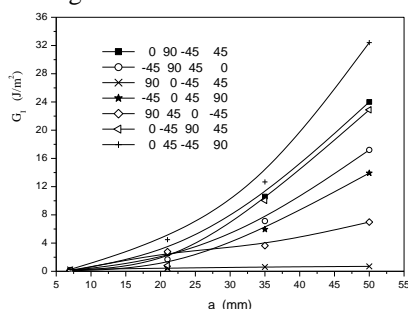


Fig.5. Effet de la l'orientation des plis sur la variation du taux de restitution d'énergie G_I .

L'effet de la position de la fissure sur le niveau de la contrainte équivalente est indiqué sur la figure 7. En effet, la contrainte équivalente croît du bord vers le front de fissure. Dans ce cas, le front de fissure change de position avec l'interface, ce qui explique le décalage du maximum des contraintes observé sur la figure 8. Pour les interfaces 1/2 et 2/3, nous remarquons qu'au-delà de la position normalisée 0,2, la contrainte équivalente reste presque constante, alors qu'à l'interface 3/4 cette contrainte chute juste après la position 0,2. Nous notons cependant que le changement de la position de la fissure dans les interfaces, conduit presque aux mêmes valeurs maximales de la contrainte équivalente. La contrainte maximale à l'interface 1/2 dépasse les contraintes des autres interfaces de 10 %.

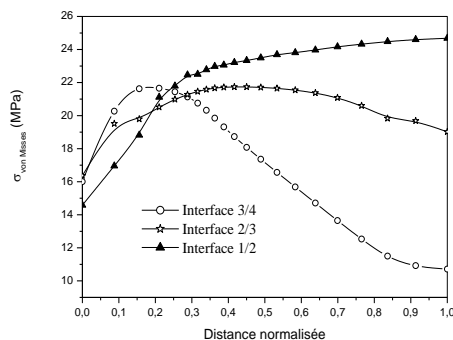


Fig. 7. Effet de la position de la fissure sur le niveau de la contrainte équivalente.

IV. CONCLUSION

- La propagation de fissure de délaminage conduit à l'augmentation du taux de restitution d'énergie. Une taille critique de la fissure a été mise en évidence, au-delà de laquelle l'énergie de rupture à sa pointe augmente. Cet accroissement est plus marqué pour une fissure située à l'interface des deux derniers plis de l'éprouvette composite. La position médiane de la structure située entre les plis d'orientation à 0° conduit à des niveaux d'énergies de rupture les plus faibles.

- L'effet de l'orientation des plis sur la variation de l'énergie de rupture apparaît lorsque la longueur de la fissure dépasse sa valeur critique. Pour les faibles tailles de fissure, l'orientation des plis des différentes couches n'a pratiquement aucun effet sur le niveau de l'énergie G_I ;

REFERENCES

- [1] O. Allix, P. Ladeveze, A. Corigliano. Damage analysis of interlaminar fracture specimens, *Composites Structures*, 1995 (31), pp. 61-74.
- [2] P. Robinson and D.Q Song. A modified DCB specimen for mode I testing of multidirectional laminates. *Journal of composite materials*, 1992 (26), pp. 1554-1577.
- [3] A. Laksimi, A Ahmed Benyahia, M.L. Benzeggagh, and X.L. Gong. Initiation and bifurcation mechanisms of cracks in multi-directional laminates. *Composites science and technology*, 2000 (60) pp. 597-604.
- [4] R. Olsson. A survey of test methods for multiaxial and out-of- plane strength of composite laminates". *Composites Science and Technology*. 2011 (71), pp. 773-783.
- [5] A. J. Brunner, B. R. K. Blackman, P. Davies. Mode I delamination: Fracture mechanics testing methods for polymers, adhesives and composites, 2001 (28) pp. 277-305.
- [6] ASTM, "Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates". *American Society for Testing and Materials*, D2344/D2344M-00, 2006.
- [7] Y. Meziere. "Tolérance au dommage, étude du délaminage dans les matériaux composites a matrice organique". *Thèse de l'université Paul Sabatier*, 2000.
- [8] X.J. Gong. "Rupture interlaminaire en mode mixte I+II du composite stratifié verre/époxy unidirectionnel et multidirectionnel". *Thèse : Mécanique appliquée, acoustique, et matériaux*. Compiègne : Université de technologie de Compiègne, 1992.
- [9] M.J. Hiley. Delamination between multi-directional ply interfaces in carbon-epoxy composites under static and fatigue loading. Dans: *Fracture of polymers, composites, and adhesives*. Ed. par J.G. WILLIAMS & A. PAVAN. Oxford, Royaume-Uni :Elsevier Science Ltd., 2000, p. 61-72.
- [10] Abaqus/CAE Ver 6.11 User's Manual. Hibbit, Karlsson&Sorensen, Inc; 2007
- [11] F. Lachaud, C.Espinosa, L. Michel. Prévission de l'endommagement de composites stratifiés carbone-époxy sous chargement de type impact, *17eme Journées Nationales sur les Composites*, Poitiers, 2011.
- [12] F.Lachaud, B.Lorrain, L. Michel, R.Barriol. Experimental and numerical study of delamination caused by local buckling of thermoplastic and thermoset composites, *Composite Science and Technology*. 1998 (5).
- [13] F. Lachaud. "Délaminage de matériaux composites a fibres de carbone et a matrices organiques : étude numérique et expérimentale, suivi par émission acoustique". *Thèse de l'Université Paul Sabatier*. 1997.

