

Etude expérimentale du comportement thermomécanique de la rupture interlaminaire d'un stratifié composite

Experimental study of the thermomechanical behaviour of interlaminar failure for laminated composites

Jawad Naciri^{1,2}, Christophe Bouvet¹, Claire Morel¹, Ayoub Soufri² et Léon Ratsifandriahana²

1 : Institut Clément Ader, ISAE-SUPAERO-INSA-IMT Mines Albi-UPS-CNRS
10 Av Edouard Belin 31400 Toulouse Cedex 4, France
e-mail : jawad.naciri@isae-supaeero.fr

2 : Segula Technologies – ZAC des Ramassiers, Equinox,
24 Boulevard Deodat de Séverac, 31770, 31770 Colomiers

Résumé

Les composites, grâce à leur résistance spécifique élevée, sont essentiels pour l'allègement des structures, notamment en aéronautique. Cependant, leur sensibilité aux dommages, en particulier au délaminage, impose une analyse fine des mécanismes d'endommagement. Les essais *Double Cantilever Beam* (DCB) et *End Notched Flexure* (ENF) permettent d'étudier la rupture interlaminaire en modes I & II. Cette étude se concentre sur la caractérisation du taux de restitution d'énergie critique en combinant données mécaniques et signatures thermiques de la rupture. Cette approche quantitative permet aussi de décrire le scénario de rupture. L'approche thermique permet l'étude de la propagation instable de fissure en mode II, les méthodes semi-analytiques ne tenant pas compte de la part d'énergie cinétique lors de la propagation. Deux séquences de drapages sont examinées : $[0_{16}] / [0_{20}]$ pour déterminer G_{ic} selon la norme ASTM ainsi que $[0/45/90/-45]_{2s}$ pour un cas quasi-isotrope plus représentatif des drapages utilisés industriellement. Les résultats des courbes effort/déplacement et des calculs de G_{ic} pour les drapages UD 0° s'accordent avec la littérature. Les signatures thermiques (bien que faibles pour les essais DCB) offrent une estimation du critère énergétique, enrichissant l'analyse des scénarios de rupture, tout particulièrement pour les essais sur la propagation instable en mode II.

Abstract

Composites, with their high specific strength, are essential for lightweight structural applications, particularly in the aerospace sector. However, their sensitivity to damage, especially delamination, requires a detailed understanding of damage mechanisms. Double Cantilever Beam (DCB) and End Notched Flexure (ENF) tests are used to study interlaminar fracture in modes I and II. This study focuses on characterizing the critical energy release rate G_{ic} by combining mechanical data and thermal fracture signatures. This quantitative thermal approach enables both the description of the fracture scenario and the evaluation of the associated G_{ic} . Thermal analysis also addresses unstable crack propagation in mode II, where semi-analytical methods neglect the kinetic energy contribution during propagation. Two laminate sequences are investigated: $[0_{16}] / [0_{20}]$, following ASTM standards and $[0/45/90/-45]_{2s}$, representing a realistic quasi-isotropic case. Results for UD 0° laminates show consistency with the literature in terms of force-displacement curves and fracture toughness values. Although weak for DCB tests, thermal signatures provide an energy criterion estimate, enhancing the fracture analysis. This is particularly significant for mode II instable propagation, where the combination of mechanical and thermal data offers a comprehensive understanding of fracture behavior.

Mots Clés : Matériaux composite, Rupture interlaminaire, thermomécanique, taux de restitution d'énergie critique
Keywords: Composite material, Interlaminar failure, Thermomechanics, Critical strain energy release rate

1. Introduction

1.1 Positionnement du problème

L'utilisation croissante des matériaux composites dans l'industrie s'explique par leur excellente résistance spécifique, faisant d'eux des candidats privilégiés pour l'allègement des structures, notamment dans le domaine aéronautique. Ces matériaux sont cependant très sensibles aux dommages, et leur rupture peut se diviser en trois catégories : la rupture interlaminaire, ou délaminage, la rupture intralaminaire, ou fissuration matricielle, et la rupture translaminaire, ou rupture des fibres [1], [2]. Cependant, l'étude de ces modes de rupture est complexe, car dans une structure réelle, la ruine résulte souvent d'une combinaison de ces différents types d'endommagement. Il convient de commencer par étudier ces modes de rupture séparément, en utilisant des essais visant, autant que possible, à isoler un seul de ces mécanismes.

Les travaux présentés par la suite s'intéressent au délaminage en explorant une méthodologie se basant sur deux approches : une approche mécanique utilisant les normes ASTM correspondantes [3], [4] et une approche basée sur la thermographie infrarouge, permettant de mesurer les énergies dissipées au cours des mécanismes de rupture, de relever les champs de température et d'estimer le taux de restitution d'énergie critique [5]. La thermographie infrarouge (TIR) permet aussi d'estimer la ténacité dans des cas où plusieurs mécanismes sont mêlés, comme lors du couplage délaminage/fissuration matricielle. L'étude du délaminage à l'aide de la TIR semble rarement abordée dans la littérature [6], probablement à cause du caractère faiblement énergétique de ce mécanisme.

L'objectif des travaux est de valider une méthodologie expérimentale permettant de mesurer et caractériser le taux de restitution d'énergie critique pour différents modes de rupture ainsi que de relever la signature thermique de ces endommagements. Ces signatures serviront à alimenter et fiabiliser un modèle numérique intégrant le comportement thermomécanique de l'endommagement, afin de modéliser avec précision le comportement des structures composites. Par la suite, seuls la méthode expérimentale et les résultats obtenus seront présentés.

1.2 Démarche expérimentale

Les essais *Double Cantilever Beam* (DCB) et *End Notched Flexure* (ENF) ainsi que la variation en flexion 4 points (4ENF) sont menés sur des éprouvettes carbone/époxy AS4/8552 avec les deux drapages suivants : $[0_{16}] / [0_{20}]$ et $[0/45/90/-45]_{2s}$. Un insert en téflon est placé à mi-épaisseur afin d'amorcer la fissure dans les interfaces 0/0 et -45/-45 respectivement. Les essais sont instrumentés à l'aide de stéréo corrélation d'images numériques (CIN) afin de suivre les déplacements ainsi que visualiser l'avancée de fissure par suivi de l'erreur de corrélation. Une caméra rapide infrarouge Télops Fast MK3 (d'une résolution de 320x256 pixels) est utilisée pour relever la signature thermique lors des essais de délaminage. Le montage de l'essai DCB a été modifié pour intégrer un objectif macro, afin de visualiser la tranche des spécimens lors de la fissuration. Cette visualisation est permise par le montage expérimental présenté en **Fig. 1**, qui fixe l'éprouvette par encastrement. Selon l'objectif utilisé, la TIR permet soit de repérer la fissure, soit de relever plus précisément le champ de température lors de la progression de la fissure sur la tranche de l'éprouvette. Ces essais sont réalisés sur deux machines électromécaniques, 3R et INSTRON, pour les essais DCB et ENF/4ENF respectivement. Les efforts sont mesurés à l'aide d'une cellule 10 kN et les déplacements sont simplement évalués avec la CIN. Les paramètres géométriques ainsi que les paramètres d'essais sont résumés dans les **Tab. 1** et **Tab. 2**. Pour les essais 4ENF, les distances inter-appuis sont données pour les rouleaux de support et de chargement respectivement.

Essai	Longueur (mm)	Largueur (mm)	Epaisseur (mm)	Distance inter-appui (mm)
DCB $[0_{16}]$	240	25	2.55-2.7	-
DCB $[0_{20}]$	218	25	3.65-3.75	-
DCB $[0/45/90/-45]_{2s}$	240	25	2.55-2.8	-
ENF $[0_{16}]$	240	25	2.8-3	200
4ENF $[0_{20}]$	240	25	3.55-3.8	160/100

Tab. 1. Paramètres géométriques des essais DCB et ENF/4ENF.

Essai	Caméra CIN	Caméra IR	Vitesse de chargement
DCB $[0_{20}]$ 1-2	8 MPx, 4 Hz	0.08 MPx 10 Hz	25 mm/min
DCB $[0_{20}]$ 3-5	8 MPx, 4 Hz	0.08 MPx 200 Hz	200 mm/min
DCB $[0_{16}]$ 1-2	8 MPx, 4 Hz	0.08 MPx 150 Hz	200 mm/min
DCB $[0_{16}]$ 3-5	8 MPx, 4 Hz	0.08 MPx 150 Hz	300 mm/min
DCB $[0/45/90/-45]_{2s}$	8 MPx, 4 Hz	0.08 MPx 150 Hz	300 mm/min
4ENF $[0_{20}]$	8 MPx, 4 Hz	0.08 MPx 50 Hz	5 mm/min
ENF $[0_{16}]$	8 MPx, 4 Hz	0.08 MPx 150 Hz	20 mm/min

Tab. 2. Paramètres des caméras CIN et IR et vitesse de chargement

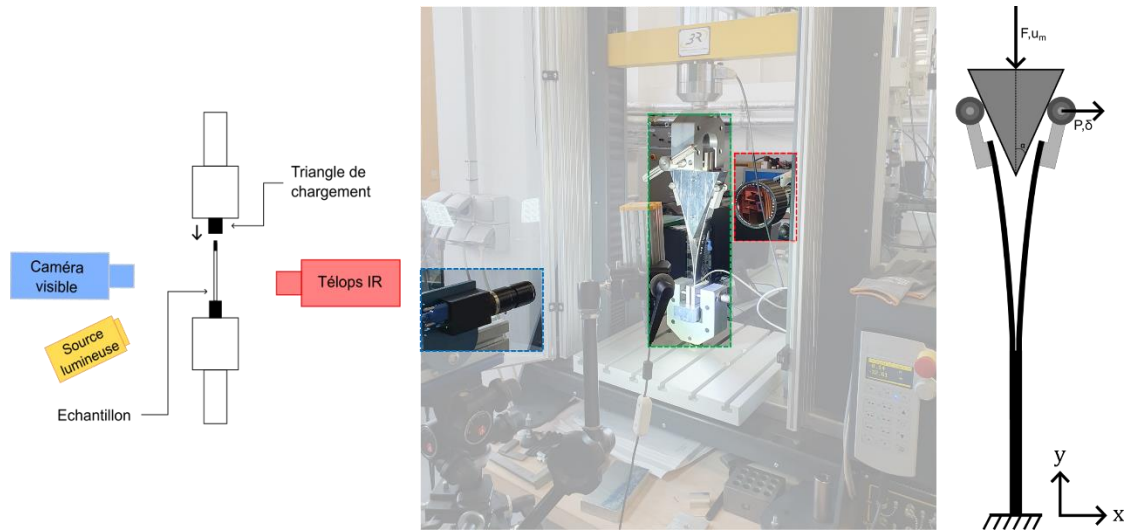


Fig. 1. Montage expérimental de l'essai DCB et schéma explicatif du chargement.

2. Résultats expérimentaux – Essais DCB

Les taux de restitution d'énergie critique sont calculés pour les différents spécimens à l'aide de la méthode de la complaisance (*Compliance Calibration – CC*) et de la méthode des poutres (*Modified Beam Theory – MBT*). Les valeurs moyennes de ténacité obtenues pour les éprouvettes UD 0° à 16 et 20 plis sont respectivement de $0,27 \text{ kJ/m}^2$ et $0,3 \text{ kJ/m}^2$, avec des résultats très proches pour les méthodes CC et MBT. Ces taux de restitution d'énergie critique sont cohérents avec les valeurs issues de la littérature bien qu'un peu plus élevés [7], [8].

L'utilisation de la signature thermique permet aussi d'obtenir une estimation de la ténacité. Sur une ligne orthogonale à la fissure en considérant le problème thermique indépendant par rapport à la direction de propagation et en négligeant les effets de convection, l'équation de la chaleur se simplifie et le taux de restitution d'énergie critique s'écrit :

$$G_{Ic} = \frac{1}{\beta} \frac{1}{l_{cal}} \int_{l_{cal}} \rho C \theta dx \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec β le coefficient de Taylor-Quinney (ici $\beta = 0.9$) [9] qui traduit la proportion de l'énergie mécanique des processus irréversibles qui se transforme en chaleur, l_{cal} la longueur de la ligne de calcul (cf. Fig. 2), $\theta = T - T_0$ la différence entre la température initiale et celle instantanée et ρ et C la masse volumique et la chaleur spécifique respectivement (avec $\rho = 1580 \text{ kg/m}^3$ et $C = 950 \text{ J/kg.K}$). Les éprouvettes UD 0° n'ayant dissipé que très peu de chaleur, les G_{Ic} estimés via ce calcul sont trop faibles (en moyenne $0,04 \text{ kJ/m}^2$ pour les éprouvettes UD 0°).

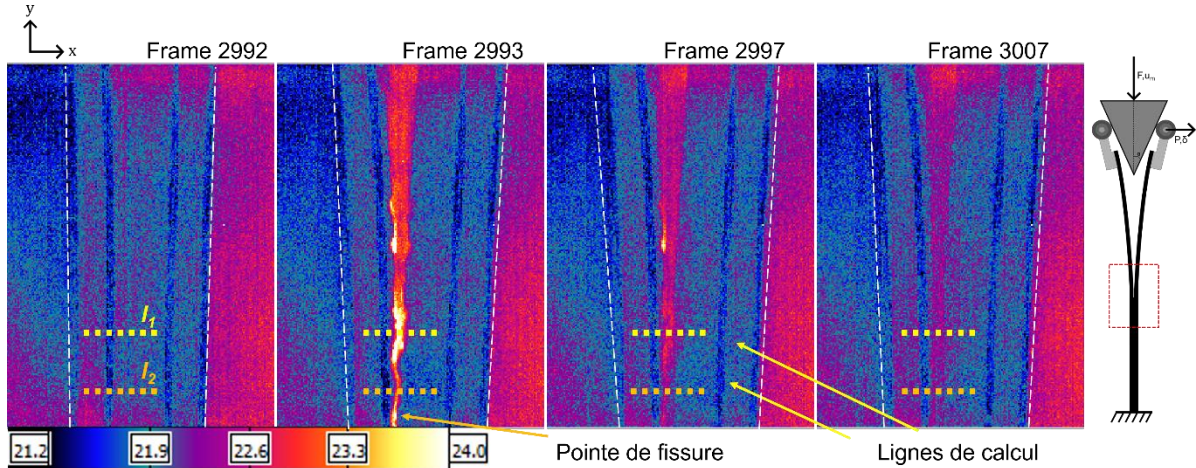


Fig. 2. Evolution de la signature thermique d'une fissuration sur une éprouvette quasi-isotrope pour un essai DCB.

Le même calcul est fait pour les éprouvettes quasi-isotropes $[0/45/90/-45]_{2s}$. Celles-ci ne permettent pas l'utilisation des méthodes semi-analytiques d'où l'utilité de la TIR. La ténacité obtenue sur la ligne l_1 est de 0.014 kJ/m^2 tandis que celle de ligne l_2 est de l'ordre de 0.015 kJ/m^2 . Sur ces lignes, la contribution énergétique pourrait provenir d'un changement d'interface et donc de fissuration matricielle ainsi qu'éventuellement de pontage de fibres. Il est aussi notable que le mode I étant un mode d'ouverture, la chaleur visible peut également provenir du délaminage qui se produit de façon similaire sur l'ensemble de la largeur de l'éprouvette (ici dans la direction normale au plan d'observation). Cependant, cette valeur excessivement faible ne représente pas bien les phénomènes observés, ce qui indiquerait la nécessité d'avoir des mesures moins bruitées et plus résolues. La nature du mode I pourrait aussi compliquer l'estimation thermique du taux de restitution d'énergie critique, étant donné que la chaleur se dissipe non seulement en conduction à travers le composite, mais aussi par convection sur les nouvelles surfaces délaminées.

3. Résultats expérimentaux – Essais ENF/4ENF

La même méthodologie est appliquée pour déterminer la ténacité en mode II. L'essai 4ENF permettant une propagation inconditionnellement stable est utilisé pour caractériser la ténacité au délaminage pour l'interface 0/0. La valeur moyenne de $0,92 \text{ kJ/m}^2$ est obtenue à l'aide de la méthode CC. Cette valeur est cohérente bien qu'elle soit un peu plus haute que celles retrouvées dans la littérature [10], [11].

La TIR permet aussi de s'intéresser à la propagation instable de fissure dans le cadre d'essais ENF où la longueur préfissurée est trop faible par rapport à la distance inter-appui (cf. Fig. 3). Le calcul se fait alors uniquement via la méthode thermique étant donné que les méthodes usuelles semi-analytiques ne sont pas adaptées à l'estimation de la ténacité pour des propagations instables. La valeur moyenne sur l'ensemble des essais de G_{IIc} est de 0.18 kJ/m^2 . Cette valeur, plus basse que celle obtenue en propagation stable, s'explique entre autres par la nature du mécanisme de rupture. La vitesse élevée de propagation de fissure implique une rupture ayant un caractère plus fragile, ce qui tend à diminuer la valeur de la ténacité (les mécanismes de plasticité n'ayant pas le temps de dissiper

de l'énergie) [6]. Ici aussi, la chaleur mesurée par TIR correspond non seulement à la dissipation d'énergie lors de la propagation de la fissure, mais aussi éventuellement au frottement des deux lèvres de la fissure l'une sur l'autre notamment sous le cylindre de chargement. Il faut cependant s'interroger sur la fiabilité des résultats au regard de la résolution spatiale (seulement 0.08 MPx) ainsi que des conditions de mesure. Il serait alors pertinent de mener ces essais avec une caméra visible rapide, afin de vérifier, à l'aide de méthodes conventionnelles, la ténacité durant les premiers instants de propagation. Il faudrait soit utiliser une caméra thermique à plus haute résolution, soit se rapprocher de l'éprouvette, quitte à ne plus pouvoir capturer la propagation sur toute la longueur.

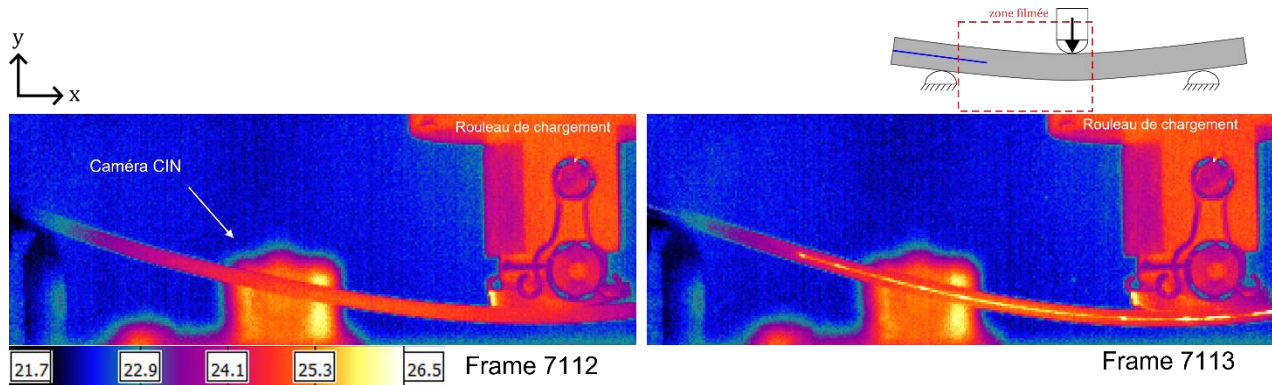


Fig. 3. Signature thermique de la propagation instable d'un délaminage pour l'essai ENF.

Au vu des problématiques expérimentales rencontrées sur les éprouvettes $[0^\circ]_{20}$, il a été décidé de ne pas traiter, dans cet article, les éprouvettes quasi-isotropes $[0/45/90/-45]_{2s}$ issues des essais ENF en propagation instable. L'interprétation des résultats est jugée trop complexe au regard des outils de mesure disponibles.

4. Conclusion

Les résultats expérimentaux obtenus sont cohérents avec la littérature, et l'utilisation de l'imagerie infrarouge a permis à la fois d'estimer le taux de restitution d'énergie critique et de quantifier les champs de température dans différents cas de figure. La corrélation entre les valeurs obtenues via les méthodes mécaniques et celles obtenues par TIR n'est cependant pas très satisfaisante pour la propagation stable.

Ces travaux ont permis de mettre en place une méthodologie expérimentale pour caractériser les phénomènes de rupture dans un stratifié composite. L'utilisation des données mécaniques est complétée par l'analyse de la signature thermique de l'endommagement, permettant à la fois de mieux cerner les mécanismes impliqués dans la rupture mais aussi de quantifier les énergies dissipées pour pouvoir, à terme, différencier les modes de rupture secondaires de ceux visés. Cette approche s'avère particulièrement utile pour comparer les résultats expérimentaux à ceux issus d'un modèle numérique d'endommagement et pour renforcer la fiabilité des simulations. En effet, pourvu que celui-ci modélise le transfert thermique et la création de chaleur due à l'endommagement, la température devient alors un critère de plus permettant de recalibrer et fiabiliser le modèle.

L'objectif est alors de mieux cerner les mécanismes en jeu à l'aide d'une analyse thermomécanique approfondie sur des essais multi-instrumentés afin d'améliorer la corrélation entre essais et calculs. Pour ce faire, il serait intéressant d'étendre l'étude à d'autres mécanismes de rupture, comme la fissuration matricielle à travers des essais de flexion trois et quatre points et de *Modified Compact Tension* (MCT), ainsi que la rupture de fibre à travers, par exemple, des essais de *Compact Tension* (CT) et *Compact Compression* (CC), *Double Edge Notched Tension* (DENT) ou *Extended Compact Tension* (ECT).

Références

- [1] R. Gutkin, « Review on failure of laminated composites: Experimental perspective and modelling », 2010.
- [2] B. W. Smith, *Fractography for continuous fiber composites*, vol. Engineered materials handbook. in Composites. Ohio, USA : ASM International., vol. Engineered materials handbook. 1993.
- [3] ASTM D5528, *Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectionnal Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites*, 2016.
- [4] ASTM D7905, *Standard Test Method for Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectionnal Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites*, 2016.
- [5] T. Lisle, C. Bouvet, N. Hongkarnjanakul, M.-L. Pastor, S. Rivallant, et P. Margueres, « Measure of fracture toughness of compressive fiber failure in composite structures using infrared thermography », *Compos. Sci. Technol.*, vol. 112, p. 22-33, mai 2015, doi: 10.1016/j.compscitech.2015.03.005.
- [6] P. Garcia Perez, C. Bouvet, A. Chettah, F. Dau, L. Ballere, et P. Pérès, « Effect of unstable crack growth on mode II interlaminar fracture toughness of a thermoplastic PEEK composite », *Eng. Fract. Mech.*, vol. 205, p. 486-497, janv. 2019, doi: 10.1016/j.engfracmech.2018.11.022.
- [7] W. Xu et Z. Z. Guo, « A simple method for determining the mode I interlaminar fracture toughness of composite without measuring the growing crack length », *Eng. Fract. Mech.*, vol. 191, p. 476-485, mars 2018, doi: 10.1016/j.engfracmech.2018.01.014.
- [8] M. Mathews et S. Swanson, « Characterization of the interlaminar fracture toughness of a laminated carbon/epoxy composite », *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, n° 7-8, p. 1489-1498, juin 2007, doi: 10.1016/j.compscitech.2006.07.035.
- [9] G. I. Taylor et H. Quinney, « The latent energy remaining in a metal after cold working », *Proc. R. Soc. Lond. Ser. Contain. Pap. Math. Phys. Character*, vol. 143, n° 849, p. 307-326, janv. 1997, doi: 10.1098/rspa.1934.0004.
- [10] M. J. Mathews et S. R. Swanson, « Characterization of the interlaminar fracture toughness of a laminated carbon/epoxy composite », *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, n° 7, p. 1489-1498, juin 2007, doi: 10.1016/j.compscitech.2006.07.035.
- [11] W.-X. Wang, M. Nakata, Y. Takao, et T. Matsubara, « Experimental investigation on test methods for mode II interlaminar fracture testing of carbon fiber reinforced composites », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 40, n° 9, p. 1447-1455, sept. 2009, doi: 10.1016/j.compositesa.2009.04.029.