

Proposition d'un essai HTDCB pour l'évaluation de la résistance au délaminage en mode I de composites stratifiés fins

Proposal of a HTDCB test for the evaluation of mode I delamination resistance of thin composite laminates

A. STANEK^{1,2}, C. BOIS^{1,2} et J.B. KOPP^{1,2}

1 : Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295

2 : Arts et Métiers Institute of Technology, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295

Talence F-33400, France

alexis.stanek@ensam.eu

christophe.bois@u-bordeaux.fr

jean-benoit.kopp@ensam.eu

Résumé

Le développement d'une géométrie de talons HTDCB (Height Tapered Double Cantilever Beam) spécifiques pour l'évaluation des énergies de rupture de composites stratifiés sollicités en mode I a été étudié. Les talons de l'essai HTDCB sont conçus de sorte à assurer une propagation de fissure en régime quasi-permanent au regard de considérations purement géométriques. Dans une première partie, la méthode analytique employée pour la détermination d'une telle géométrie par le biais de la théorie classique des poutres d'Euler-Bernoulli (EBBT) est présentée. La seconde partie adresse la validité d'emploi de la théorie des poutres pour répondre au problème tel qu'il a été posé, en comparant cette méthode aux résultats obtenus par la méthode des éléments finis. Enfin, les méthodes expérimentales et numériques qui seront utilisées pour le traitement des essais sont présentées. Les résultats préliminaires obtenus numériquement indiquent que la géométrie conçue devrait permettre de garantir un taux de restitution d'énergie constant au cours de la propagation de fissure susceptible de favoriser sa stabilité sur une distance d'environ 100 mm.

Abstract

This study describes the development of specific test fixtures for the characterization of mode I fracture energies of composite laminates. These test fixtures have been developed to ensure quasi-stationary crack propagation with regards to purely geometrical considerations. The first section of this paper describes the approach used to analytically estimate the optimal shape of test fixtures allowing stable crack propagation using classical Euler-Bernoulli beam theory (EBBT). The second section addresses the shortcomings of the EBBT and treats the problem via an iterative finite element study. Then, the experimental and numerical methods that will be used are presented. Finally, the preliminary numerical results indicate that these test fixtures should be able to ensure a constant energy release rate during crack propagation over a 100 mm distance, which should in turn promote stable crack propagation.

Mots Clés : Délaminage, Essai DCB modifié, Mécanique de la rupture, Modèles de Zones Cohésives

Keywords : Delamination, Modified DCB test, Fracture mechanics, Cohesive Zone Models

1. Introduction – l'évaluation de la résistance au délaminage de stratifiés en mode I

Une brève lecture de la littérature sur la caractérisation des propriétés à rupture d'interfaces inter laminaires de composites stratifiés fait apparaître les difficultés rencontrées dans l'évaluation de celles-ci. L'essai principalement utilisé pour l'évaluation des énergies de rupture en mode I – l'essai Double Cantilever Beam (DCB) (Fig. 1-a) proposé par la norme ASTM D5528-13 [1] et qui consiste à étudier le comportement en ouverture d'une éprouvette composite pré-entallée – peut être remis en question du fait des nombreux biais expérimentaux et d'analyse qu'il introduit. En effet, comme cela a notamment été mis en exergue dans le domaine des adhésifs, la réalisation et l'analyse de ces essais peut s'avérer plus complexe qu'elle n'y paraît : la cinématique de l'essai peut induire des rotations des sections droites des bras DCB, du cisaillement [2], des effets de courbures anticlastiques [3] et surtout des difficultés expérimentales de mesure de la position exacte de la pointe fissure. De plus, la grande variabilité des architectures de tissage, des matériaux constitutifs et des procédés de fabrication des composites stratifiés fait entrer en jeu des hétérogénéités de ténacités pilotées par la microstructure. Ainsi les courbes résultantes d'essais DCB sont marquées par des phénomènes de stick-slip (Fig. 1-b) et donc par une succession de propagations et d'arrêts de fissures instables s'exprimant à vitesses de propagation différentes.

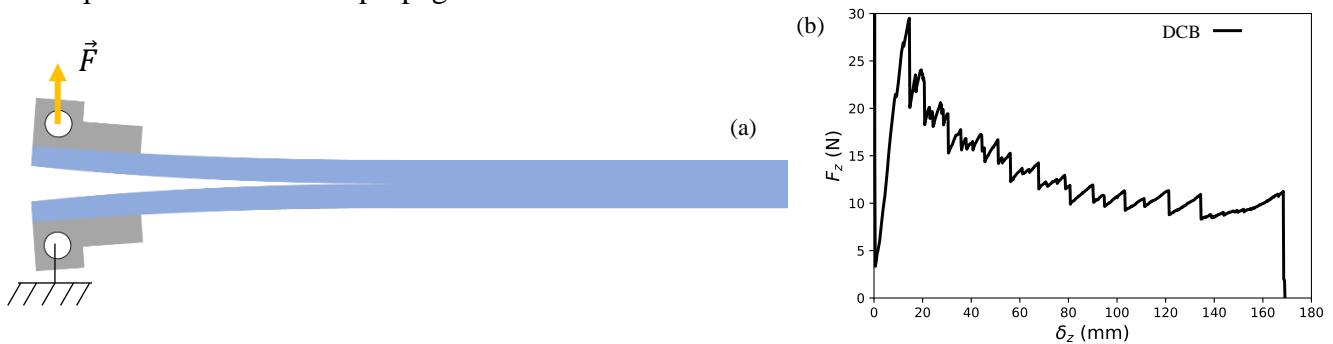


Figure 1. Essai DCB sur composite stratifié

(a) Cinématique de l'essai DCB – (b) Courbe force-déplacement typique d'un essai DCB sur composite stratifié

L'essai DCB, dans son post-traitement usuel proposé par la norme ASTM D5528-13, fournit une unique valeur de taux de restitution d'énergie critique. Or, de rares résultats expérimentaux sur des matériaux à base epoxyde [4] indiquent que les taux de restitution d'énergie critique en régime dynamique sont plus faibles que ceux obtenus à basses vitesses de sollicitations. Ainsi, la valeur obtenue lors d'un essai DCB moyenne une multiplicité de valeurs de taux de restitution d'énergie critique. Cependant, des travaux numériques ont mis en lumière l'importance de la qualité de l'évaluation de ces propriétés dépendantes de la vitesse de sollicitation sur la fiabilité des modèles prédictifs du comportement de structures composites [5-6].

Ainsi, on est en droit de s'interroger sur la pertinence des valeurs de taux de restitution d'énergie critique obtenues par l'essai DCB et la représentativité des modèles numériques qui en découlent.

Partant de ce constat, les auteurs proposent de définir des essais permettant d'obtenir un régime de fissuration quasi-permanent en jouant sur la géométrie des spécimens. Ceux-ci devraient permettre de s'affranchir des forts effets géométriques et cinématiques de l'essai DCB et ainsi de dissocier les contributions matériaux et structures sur les énergies de rupture mesurées.

2. Géométrie de talon visant à obtenir un régime de fissuration quasi-permanent en mode I

a. Principe de détermination de la géométrie des talons

La formule, bien connue, d'Irwin-Kies permet de calculer le taux de restitution d'énergie d'une structure au regard de ses paramètres géométriques et du chargement qu'elle subie :

$$G(a) = \frac{P^2}{2.B} \cdot \frac{dC(a)}{da} \quad (\text{Eq. 1})$$

Où a est la longueur de fissure, $G(a)$ est le taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure, P est l'effort appliqué, B est la largeur du spécimen et $\frac{dC(a)}{da}$ désigne la dérivée de la complaisance élastique du spécimen.

Selon Griffith, il y a propagation de fissure lorsque la valeur du taux de restitution d'énergie, $G(a)$, atteint la valeur du taux de restitution d'énergie critique du couple matériau-structure, $G_c(a)$. Il est aussi possible de statuer sur la stabilité de la propagation de fissure en comparant les dérivées premières de $G(a)$ et de $G_c(a)$ [7].

Usuellement, sa propagation est dite stable lorsque :

$$\begin{cases} G = G_c \\ \frac{dG(a)}{da} - \frac{dG_c(a)}{da} \leq 0 \end{cases} \quad (\text{Eq. 2})$$

A l'inverse, la fissure est dite instable lorsque :

$$\frac{dG(a)}{da} - \frac{dG_c(a)}{da} > 0 \quad (\text{Eq. 3})$$

Ainsi, selon la formule d'Irwin-Kies, il est possible de proposer une géométrie de spécimen assurant une dérivée de la complaisance constante sur toute sa longueur. En considérant l'activation d'une unique valeur de G_c , cela se traduirait par une propagation de fissure stable sur toute la longueur du spécimen pour un chargement constant. En effet, le taux de restitution d'énergie serait alors proportionnel à P^2 :

$$G(a) \propto \frac{P^2}{2.B} \quad (\text{Eq. 4})$$

De telle sorte, l'estimation d'un taux de restitution d'énergie critique serait possible sans nécessiter de mesurer la longueur de fissure. Cela permettrait ainsi de s'affranchir des nombreux questionnements expérimentaux mentionnés préalablement.

Dans l'étude des adhésifs, des auteurs [8] et la norme ASTM-D3433-99 [9] ont déjà mené des réflexions similaires avec le développement d'une géométrie de talons TDCB (Tapered Double Cantilever Beam) fournissant une évolution quasi-linéaire de la complaisance (Fig. 2).

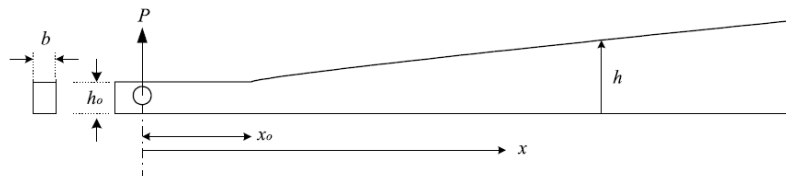


Figure 2. Talon TDCB [8] – Vue de face et vue de côté

Il est possible de postuler qu'il existe une ou plusieurs formes de fonctions décrivant l'évolution de la hauteur de la poutre qui permettraient d'obtenir une dérivée de la complaisance constante. Pour ce faire, il faudrait que la complaisance évolue linéairement en fonction de l'avancée de fissure a .

Partant du principe que la réalisation de tels collages serait d'autant plus contraignante sur des éprouvettes composites pré-entallées (double encollage d'éprouvettes avec des tranches polies au préalable) les auteurs proposent une géométrie de talon HTDCB avec une section en T à hauteur variable fabriquée en aluminium 2017A (Fig. 3).

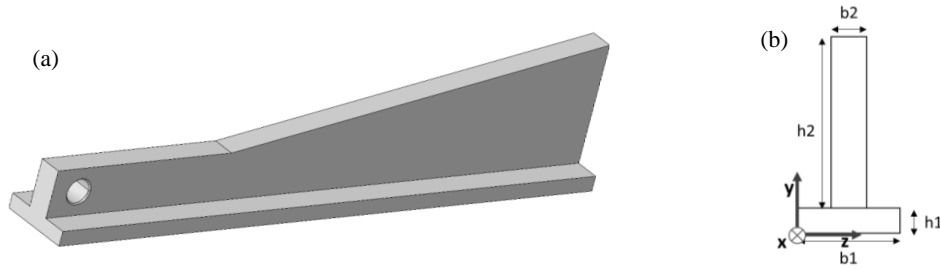


Figure 3. Géométrie de talons HTDCB avec une section en T à hauteur variable
(a) Vue isométrique – (b) Vue de face

En utilisant la théorie des poutres d’Euler Bernoulli (EBBT) et la définition de la complaisance élastique il est possible d’obtenir une équation liant l’évolution de la complaisance à la déflexion maximale de la poutre et donc à la fonction $h2(a)$ (décrivant l’évolution de la hauteur de la poutre). La résolution d’une telle équation s’avère complexe dans la mesure où la forme du moment quadratique, et son expression selon la variation de hauteur de la poutre, est elle aussi rendue complexe par la nature de la section en T (et l’emploi sous-jacent du théorème de Huygens). Ainsi, dans un souci de simplicité, tant sur un plan mathématique que technique, nous avons fixé l’évolution de hauteur $h2(a)$ et vérifié la linéarité l’évolution de la complaisance élastique, pour un chargement donné. Les résultats, pour une géométrie avec un angle de 10° , sont présentés en Fig. 4.

b. Flexion d’une poutre en T encastree à section et longueur variables

i. Poutre sans colle ni composite – Comparaison entre la EBBT et la méthode des éléments finis

Les résultats obtenus par la EBBT sont comparés à ceux-obtenus par le biais de modèles éléments finis simplifiés. Pour les 2 approches, la géométrie est encastree à des positions successives, supposées rendre compte de l’avancée d’une fissure. En pointe de fissure, une condition d’encastrement impliquant une absence de la rotation des talons est appliquée. On applique un effort constant et on relève, pour chacune des positions d’encastrement, la valeur du déplacement. La complaisance est alors mesurée par le rapport entre le déplacement obtenu et le chargement appliqué. Dans un premier temps, nous faisons l’hypothèse que les contributions des rigidités en flexion des joints collés et du composite en lui-même sont négligeables par rapport à celle apportée par le substrat en aluminium. Ainsi seule la poutre en aluminium est considérée.

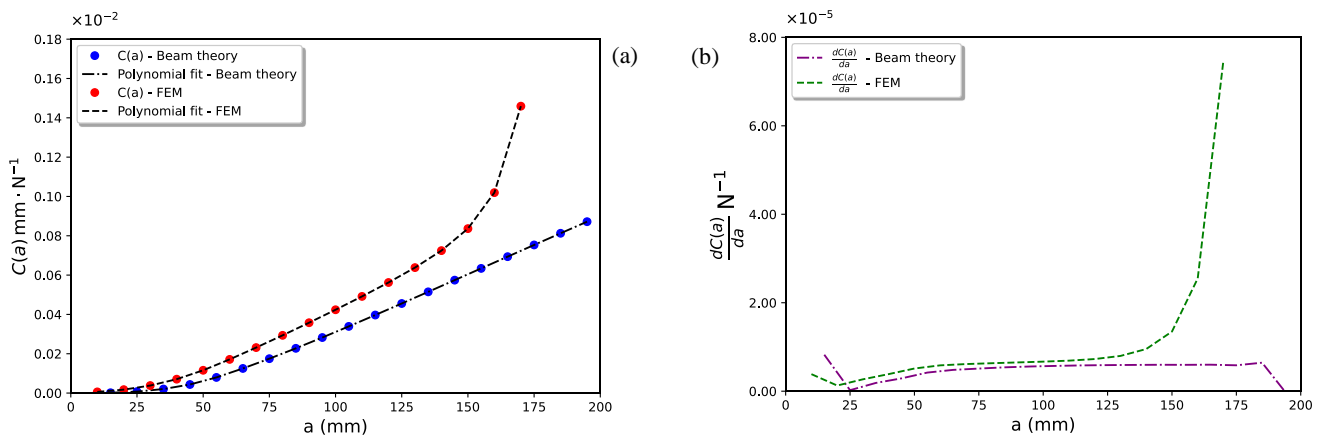


Figure 4. Comparaison des résultats obtenus par la EBBT et ceux obtenus par calculs éléments finis
(a) Evolutions des complaisances – (b) Evolutions des dérivées des complaisances

Il existe un écart notable entre les résultats obtenus par la théorie des poutres et ceux obtenus par éléments finis (Fig. 4).

Une piste d’explication repose sur le fait que la géométrie d’intérêt, du fait de son élancement limité, s’éloigne du cadre théorique idéalisé de la EBBT.

Cependant, et ce malgré l'écart entre les résultats, ceux-ci indiquent tous deux la présence d'un plateau avec une quasi-constance de la dérivée de la complaisance, ce qui répond aux objectifs initiaux affichés de la géométrie de talons HTDCB.

ii. Modélisation explicite de la colle et du composite par la méthode des éléments finis

Afin de valider les résultats présentés ci-dessus, une seconde série de calculs éléments finis a été réalisée. Dans ceux-ci, étaient représentés, une colle epoxyde bi-composants d'une épaisseur de 150 μm (HYSOL EA9396) et un composite carbone epoxy tissé de 870 μm (Satin 5 équilibré – AS4-3K – matrice Hexcel 8552S selon l'empilement $[0^\circ/45^\circ/90^\circ]$).

Les graphiques présentés en Fig. 5 permettent de valider l'hypothèse initiale portant sur le faible apport du joint collé et du composite sur la rigidité en flexion de l'assemblage. Ces résultats numériques nous permettent de dire que la géométrie proposée permet d'obtenir une dérivée de la complaisance quasi-constante sur une longueur d'environ 100 mm.

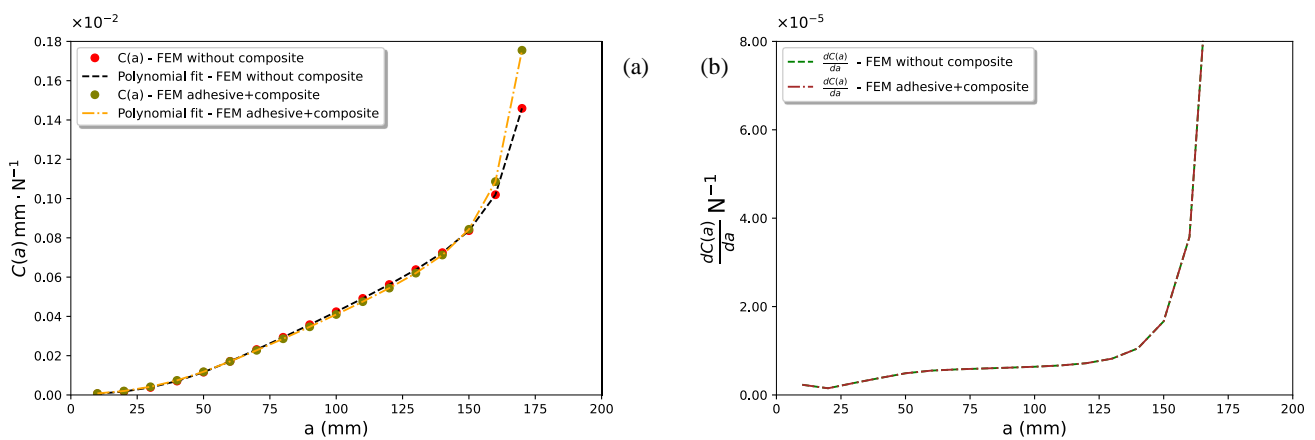


Figure 5. Comparaison des résultats obtenus par calculs éléments finis avec et sans composite
(a) Evolutions des complaisances – (b) Evolutions des dérivées des complaisances

Une analyse des taux de détermination des complaisances pour différentes valeurs de longueurs de fissure (Fig. 6) permet de définir la longueur de la pré-entaille initiale. En effet, on note que la complaisance évolue quasi-linéairement ($R^2=0.993$) pour une longueur de fissure (par rapport au point de chargement) variant de 40 mm à 140 mm. Ainsi en créant une pré-entaille, avec un film PTFE, de 40 mm il est possible d'obtenir une complaisance évoluant linéairement sur une longueur de 100 mm.

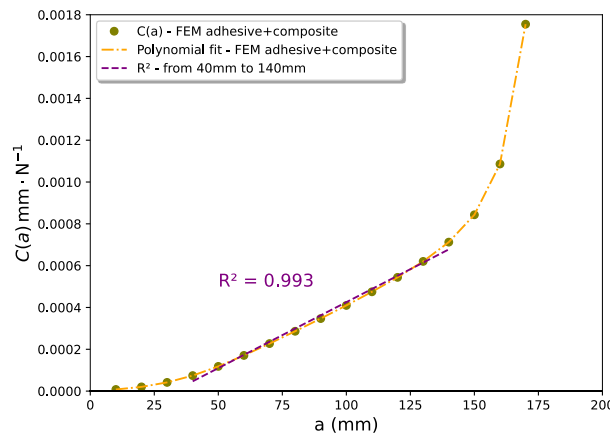


Figure 6. Complaisance de l'assemblage obtenue par calculs éléments finis avec une représentation explicite de la colle et du composite – Taux de détermination pour une pré-entaille de 40 mm

3. Perspectives

a. Simulation de la fissuration en mode I par la méthode des éléments finis

Ces résultats nous amènent désormais à la réalisation d'essais de fissuration virtuels. Dans un premier temps ceux-ci seront réalisés avec des modèles de zones cohésives (CZM) sous Abaqus®/Explicit pour un G_c constant. Ils seront par la suite enrichis par l'inclusion de lois de rupture évoluant en fonction de la vitesse de fissuration ($G_c(a)$ variable). Les résultats des premières simulations (Fig. 7) avec un G_c constant, pilotées en déplacement et avec la prise en compte des effets inertiels (par le biais de la masse volumique) donnent des courbes force-déplacement dont les allures générales sont cohérentes avec l'attendu : augmentation linéaire de l'effort avant l'amorçage suivi d'un plateau d'effort quasi-constant en cours de propagation.

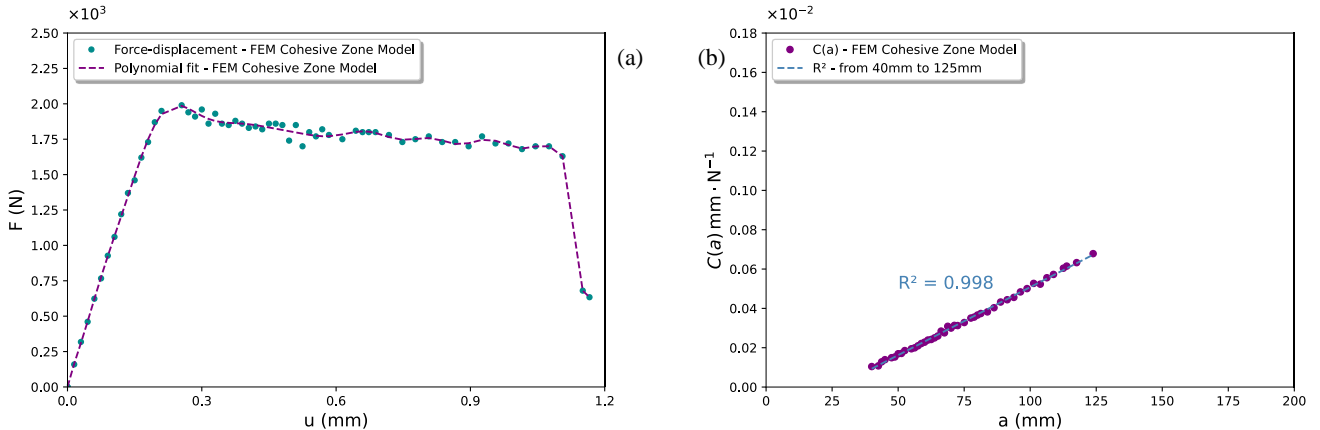


Figure 7. Premiers résultats obtenus sous Abaqus®/Explicit pour un modèle de zones cohésives
(a) Courbe force-déplacement – (b) Evolution de la complaisance

b. Méthodes expérimentales

Une campagne d'essais est prévue afin de corroborer ces premiers résultats numériques. Afin d'observer la propagation de fissure aux différentes échelles lors des essais, nous ferons appel à des méthodes d'instrumentation optiques permettant de :

1. Mesurer finement les champs de déformations par DIC (inspiré de travaux dans lesquels la mesure des champs de déformations par DIC se faisait sur une face polie au P2500 [10]) ;
2. Visualiser l'endommagement en pointe de fissure en cours de propagation aux petites échelles spatiales et temporelles (microscope optique monté sur une caméra rapide) ;

Enfin des analyses des faciès de rupture en microscopie optique et par MEB seront employées afin de corréler les endommagements aux petites échelles à la réponse macroscopique globale et à la vitesse de fissuration enregistrée.

Références :

- [1] ASTM D5528-13, Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites
- [2] R. Ly, 2017, « Modélisation du comportement des assemblages collés: analyse métrologique et prise en compte des dissipations plastique et visqueuse », PhD Thesis, Université de Bordeaux, 2017
- [3] S. Popineau, B.Gautier, P.Slangen et M.E.R Shanahan, «A 3D effect in the wedge adhesion test: application of speckle interferometry», *The Journal of Adhesion*, vol. 80, n°12, p.1173 – 1194, mar. 2004, doi: 10.1080/00218460490884349
- [4] B. R. K. Blackman, A. J. Kinloch, F. S. Rodriguez Sanchez, W. S. Teo, et J. G. Williams, « The fracture behaviour of structural adhesives under high rates of testing », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 76, n° 18, p. 2868-2889, déc. 2009, doi: 10.1016/j.engfracmech.2009.07.013.
- [5] M. May, « Measuring the rate-dependent mode I fracture toughness of composites – A review », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 81, p. 1-12, févr. 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.10.033.
- [6] M. May, « Numerical evaluation of cohesive zone models for modeling impact induced delamination in composite materials », *Composite Structures*, vol. 133, p. 16-21, déc. 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.07.032.
- [7] T.L. Anderson, « *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 4th Edition », CRC Press, 2017, doi: 10.1201/9781315370293
- [8] B. R. K. Blackman, H. Hadavinia, A. J. Kinloch, M. Paraschi, et J. G. Williams, « The calculation of adhesive fracture energies in mode I: revisiting the tapered double cantilever beam (HTDCB) test », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 70, n° 2, p. 233-248, janv. 2003, doi: 10.1016/S0013-7944(02)00031-0.
- [9] ASTM D3433-99, Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints
- [10] P. Lecomte-Grosbras, B. Paluch, M. Brieu, G. D. Saxcé, et L. Sabatier, « Interlaminar shear strain measurement on angle-ply laminate free edge using digital image correlation », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40, n° 12, p. 1911-1920, déc. 2009, doi: 10.1016/j.compositesa.2009.07.011.