

Étude numérique de l'influence des contraintes de compression hors-plan et transverse sur les endommagements en cisaillement hors-plan dans les composites stratifiés

Numerical study of the effect of through-thickness and transverse compressive stresses on out-of-plane shear damage in composite laminates

Théo Delbard^{1,2}, Christophe Bouvet¹, Samuel Rivallant¹, William Albouy²

1 : Université de Toulouse, Institut Clément Ader (UMR CNRS 5312)
ISAE-SUPAERO / INSA / IMT / Mines Albi / UPS
3 Rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse, France

e-mail : theo.delbard@isae-supero.fr ; christophe.bouvet@isae-supero.fr ; samuel.rivallant@isae-supero.fr

2 : SAFRAN Composites
33 Avenue de la Gare, 91760 Itteville, France
e-mail : william.albouy@safrangroup.com

Résumé

Parmi les nombreux essais de caractérisation hors-plan, les essais de cisaillement inter-laminaire sont souvent de premier choix. Si, en première approximation, les endommagements sont dus à des contraintes de cisaillement pur, la réalité est plus complexe. En effet, la flexion de l'éprouvette va induire des contraintes de compression hors-plan et transverse qui vont influencer de manière notable les endommagements et ainsi surévaluer la valeur à rupture en cisaillement. Dans cet article, un dialogue essais / calculs est réalisé sur la base d'essais de flexion trois points, démontrant dans un premier temps une mauvaise corrélation avec l'expérimental et mettant en défaut le critère de rupture initialement proposé. Une étude est ensuite menée afin d'identifier les aspects manquants permettant une meilleure corrélation du modèle. L'influence des contraintes de compression hors-plan et transverse sur les endommagements en cisaillement est ainsi mise en avant. Enfin, un nouveau critère de rupture est proposé et intégré dans le modèle sur les éléments d'interface modélisant le délaminage et la fissuration matricielle. Une validation est finalement réalisée, attestant d'une meilleure corrélation avec l'expérimental et démontrant ainsi l'influence des contraintes de compression sur les endommagements induits par des sollicitations hors-plan.

Abstract

Among the many out-of-plane characterization tests, inter-laminar shear tests are often the first choice. While it may initially appear that damage is due to pure shear stresses, the reality is more complex. In fact, bending solicitations will induce out-of-plane and transverse compressive stresses which will have a significant influence on damage and thus overestimate the shear failure value.

In this article, a dialogue between tests and calculations is carried out based on three-point bending tests, initially showing a poor correlation with the experimental results, and calling into question the failure criterion initially used in the model. A study is then carried out to identify the missing aspects enabling the model to achieve a better correlation. The influence of out-of-plane and transverse compressive stresses on shear damage is thus highlighted. Finally, a new failure criterion is proposed and integrated into the model on interface elements modelling delamination and matrix cracking. Finally, a validation is carried out, demonstrating a better correlation with the experimental results and the influence of compressive stresses on damage induced by out-of-plane stresses.

Mots Clés : Flexion 3 points, fissuration matricielle, délaminage, endommagement, renforcement en compression

Keywords : Modelling, matrix crack, delamination, damage, compressive stresses

1. Introduction

Les composites stratifiés carbone/époxy représentent aujourd'hui une majorité des matériaux utilisés dans la fabrication de structures aéronautiques et sont donc d'intérêt pour des motoristes

aéronautiques tels que SAFRAN. Si la tenue mécanique de ces matériaux dans le plan est relativement maîtrisée [2], ce n'est pas le cas du hors-plan dont le comportement reste encore mal compris. Dès lors, le dimensionnement et la modélisation associée deviennent plus complexes. Les sollicitations hors-plan de type flexion ou impact induisant des contraintes de traction et de cisaillement, divers endommagements sont provoqués, avec un couplage inter-plis / intra-pli plus présent que pour les chargements plans : des fissurations matricielles, des délaminages ou encore des ruptures de fibres [3].

Afin d'apporter une meilleure compréhension ainsi qu'une modélisation fine de ces endommagements, il est nécessaire de s'intéresser à l'initiation mais également à la propagation de ceux-ci. En effet, selon le type de contraintes induites, des fissurations matricielles vont, soit apparaître à mi-épaisseur dues aux contraintes de cisaillement hors-plan, soit dans la zone inférieure du stratifié dues aux contraintes de traction provoquées par la flexion de l'éprouvette [4], [5] ; s'en suit alors une propagation jusqu'aux interfaces induisant ainsi des délaminages. Ces endommagements abattant de manière conséquente la rigidité de flexion, la rupture de fibres intervient généralement peu après et peut parfois mener à la rupture catastrophique du stratifié.

Parmi les essais mettant en exergue ces endommagements, les essais de flexion trois points sont de premier choix et permettent, au-delà d'un aspect de caractérisation [6], une première observation 2D des phénomènes. Couplée à un modèle ayant déjà fait ses preuves sur des essais d'impact [1,3,7], une compréhension fine des mécanismes d'endommagement est ainsi rendue possible.

Cependant, lors de ces essais interviennent des phénomènes de compression qui peuvent exercer une influence notable sur les endommagements [8,9] : les contraintes de compression hors-plan σ_{zz} et transverse σ_{tt} induites dans le stratifié vont jouer un rôle de renforcement sur les contraintes à rupture en cisaillement et sur le taux de restitution d'énergie critique. S'il peut être parfois difficile d'étudier ce phénomène à la seule lumière d'essais expérimentaux, les dialogues essais / calculs avec des modèles tenant compte de celui-ci permettent une meilleure compréhension de l'influence de ces contraintes de compression sur les endommagements, notamment sur le délaminage [10,11].

Dans les présents travaux, des essais de flexion trois points sur stratifiés croisés ont été réalisés. Couplés à un modèle numérique, ceux-ci ont permis un premier dialogue essais / calculs et ont pu montrer certaines différences avec les endommagements observés expérimentalement. L'analyse du modèle permet de montrer l'influence des contraintes de compression sur les endommagements en cisaillement. Une amélioration du critère de rupture initialement intégré au modèle est proposée, démontrant une meilleure corrélation avec les endommagements observés expérimentalement et mettant ainsi en exergue l'influence du phénomène sur ce type d'essais.

2. Étude expérimentale

2.1 Matériau étudié et montage d'essai

Des essais de flexion trois points ont été menés sur des éprouvettes de dimension $50 \times 10 \text{ mm}^2$ (longueur \times largeur) drapées selon la séquence $[(0/90_2)_2/0/90]_s$ avec un matériau composite carbone/époxy de classe aéronautique. La machine d'essai est une machine Instron 5969 – 50 kN à laquelle est intégrée une cellule de 10 kN. Le suivi in-situ des endommagements est réalisé au moyen de deux caméras : une caméra optique classique sur la tranche droite de l'éprouvette, et une caméra thermique infrarouge (TIR) Telops sur la tranche gauche, permettant de suivre les endommagements via les dégagements de chaleur produits lors des ruptures.

2.2 Résultats

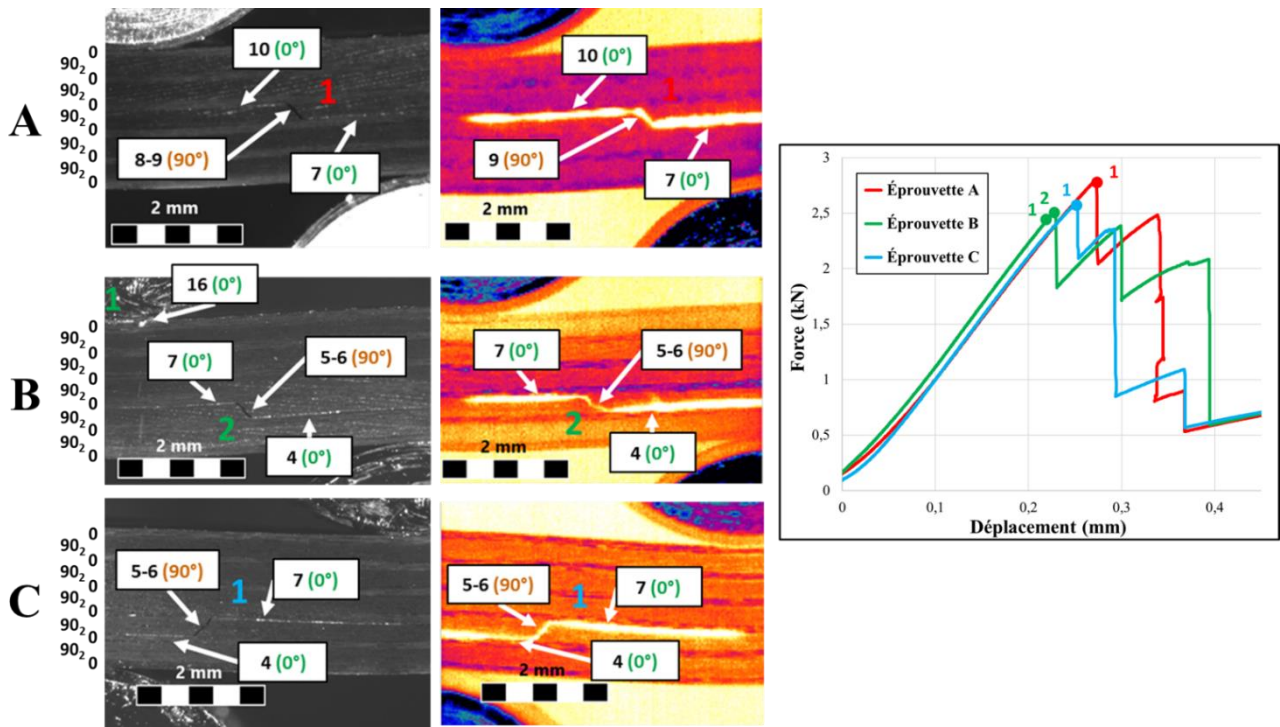


Fig. 1 : Courbes force-déplacement et faciès de rupture des éprouvettes de flexion trois points

Les résultats des essais sont présentés en Fig. 1. Les différentes visualisations des caméras ainsi que les courbes force-déplacement (recalées par rapport à leur raideur initiale) démontrent une certaine répétabilité tant au niveau de la force à rupture que sur les scénarios d'endommagement. En effet, due aux contraintes de cisaillement hors-plan induites par l'essai, une fissuration matricielle va s'initier au sein des doubles plis à 90° situés à mi-épaisseur du stratifié ou au sein de ceux proches du plan moyen. Les interfaces inférieures et supérieures des plis à 0° bloquant la propagation de la fissuration, un délaminage va par la suite s'initier et se propager.

Une différence est cependant à noter concernant l'éprouvette B. Contrairement aux deux autres éprouvettes, dont le premier endommagement est la fissuration matricielle dans les doubles plis à 90° , celui de l'éprouvette B est en réalité une légère rupture de fibres provoquée par la compression locale sous l'indenteur. L'endommagement n'étant cependant pas conséquent, il ne provoque pas une importante chute de charge et n'est par ailleurs pas traversant : en effet, cette rupture de fibres n'est visible que sur la tranche droite de l'éprouvette (visualisation caméra classique) et non sur la tranche gauche (visualisation caméra TIR).

3. Modélisation numérique

3.1 Principe du DPM (*Discrete Ply Model*)

L'essai a par la suite été modélisé via le DPM (*Discrete Ply Model*), un modèle développé depuis une vingtaine d'années à l'Institut Clément Ader [1,7,12]. Son principe, illustré en Fig. 2, repose sur la représentation de bandes de plis UD associées à la fissuration matricielle permettant d'être fidèle au couplage fissuration matricielle / délaminage observé sur ce type de composite [13]. Une discrétisation des plis est effectuée par l'insertion d'éléments cohésifs, à la fois selon la direction longitudinale du pli pour modéliser les fissurations matricielles, mais également inter-plis pour modéliser le délaminage. Grâce à cette architecture de maillage, le couplage entre ces endommagements est donc automatiquement modélisé.

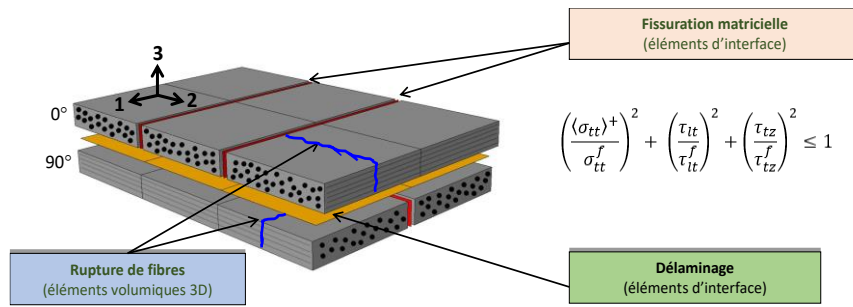


Fig. 2 : Principe général du DPM [7]

La prise en compte des endommagements se fait selon divers critères appliqués selon le type d'endommagement modélisé. La rupture de fibres est initiée par un critère en déformation tandis qu'un critère énergétique est appliqué pour le délaminage. Quant à la fissuration matricielle, c'est à la fois un critère en contraintes dans les éléments volumiques voisins et en énergie dans les éléments d'interface qui sont implémentés, permettant son initiation et sa propagation. Le critère de Hashin (Eq. 1) est classiquement utilisé :

$$\left(\frac{(\sigma_{tt})^+}{\sigma_{tt}^f}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{lt}}{\tau_{lt}^f}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{tz}}{\tau_{tz}^f}\right)^2 \leq 1 \quad (\text{Eq. 1})$$

avec σ_{tt} (σ_{tt}^f) la contrainte (à rupture) transverse d'un pli, τ_{lt} (τ_{lt}^f) et τ_{tz} (τ_{tz}^f) les contraintes (à rupture) en cisaillement, caractérisées comme les principales contraintes à l'origine des fissurations matricielles [6].

3.2 Résultats

Les premiers résultats présentés en Fig. 3 montrent la courbe force-déplacement associée à l'essai simulé ainsi que les endommagements sur le modèle avec un affichage des déplacements $\times 4$ pour une meilleure visualisation.

Les raideurs initiales sont similaires, bien qu'un adoucissement puisse être observé relativement tôt. La force à rupture est, quant à elle, inférieure aux résultats expérimentaux. La chute de charge et l'interprétation du modèle démontrent un endommagement trop brutal avec des fissurations matricielles localisées sous l'indenteur tandis que celles observées expérimentalement s'initient entre les rouleaux de flexion et d'appui. De plus, outre les fissurations matricielles induites localement dans les zones d'appui des rouleaux inférieurs, certaines sont isolées sur les plis 2-3 à 90° sans qu'il y ait de délaminages induits par la suite ; néanmoins ces endommagements n'ont pas été visibles lors des essais.

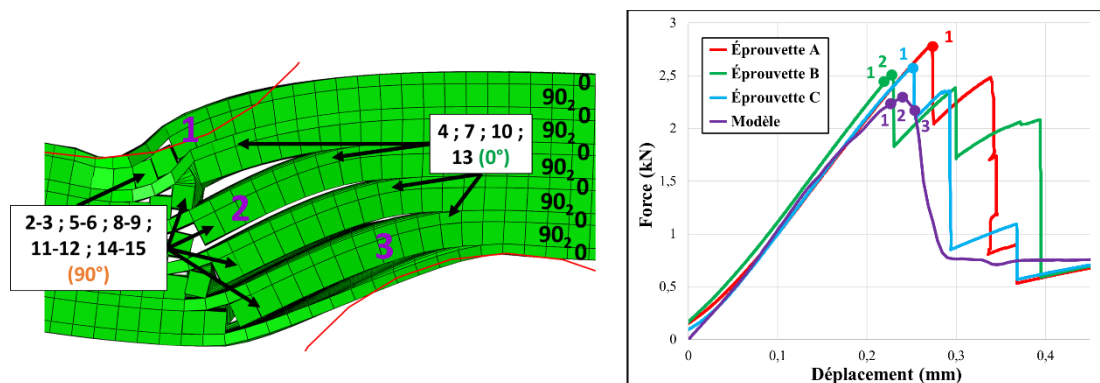


Fig. 3 : Endommagements obtenus par modèle (affichage dépl. $\times 4$) et courbes force – déplacement essais/modèle

4. Intégration d'un facteur de renforcement en compression

L'étude du modèle a par la suite permis d'identifier la raison de cette mauvaise corrélation avec l'expérimental : les fissurations matricielles normalement induites par des contraintes de cisaillement s'initient en effet trop tôt sous l'indenteur et provoquent ainsi le reste de l'endommagement observé en Fig. 3 avec notamment des délaminages s'initiant et se propageant aux interfaces inter-plis. Cet endommagement précoce est en partie dû aux importantes contraintes de compression hors-plan $\langle \sigma_{zz} \rangle^-$ et transverses $\langle \sigma_{tt} \rangle^-$ induites proches des appuis (Fig. 4) et il a déjà été montré dans la littérature [8], [9], [14] que celles-ci peuvent retarder l'initiation d'un endommagement en cisaillement typiquement observé sur ces essais.

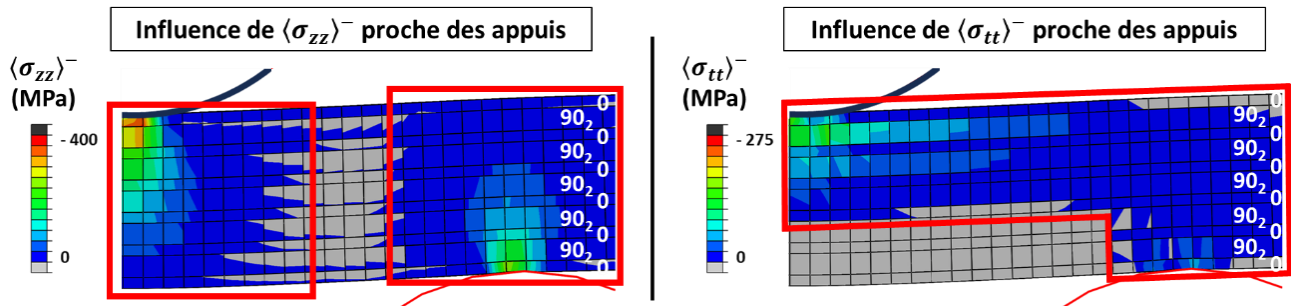


Fig. 4 : Zones d'influence des contraintes de compression $\langle \sigma_{zz} \rangle^-$ et $\langle \sigma_{tt} \rangle^-$

Dans l'hypothèse initiale du critère de Hashin, seules les contraintes de traction et de cisaillement plan et hors-plan sont prises en compte. L'endommagement étant initié trop tôt du fait du rôle des contraintes de compression, il faut donc intégrer un renforcement en compression dans les termes de cisaillement du critère.

Cependant, les contraintes prises en compte pour le renforcement dans les éléments d'interface ne seront pas les mêmes suivant le type d'endommagement modélisé : si pour le délaminage σ_{zz} peut suffire [10,15], ce n'est pas le cas pour les éléments d'interface modélisant la fissuration matricielle. En effet des contraintes de compression transverse σ_{tt} dans l'épaisseur vont également intervenir et jouer un rôle dans l'initiation de l'endommagement, en complément des contraintes de compression hors-plan σ_{zz} . Basée sur les critères de Mohr-Coulomb [16] et de LaRC (*Langley Research Center*) [9], une modification du critère initialement considéré dans le modèle est ainsi proposée (Eq. 2), incluant un renforcement en compression des contraintes de cisaillement :

$$\left(\frac{\langle \sigma_{tt} \rangle^+}{\sigma_{tt}^r} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{tz}}{\tau_{tz}^r - \eta \langle \sigma_{tt} + \sigma_{zz} \rangle^-} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{lt}}{\tau_{lt}^r - \eta \langle \sigma_{tt} \rangle^-} \right)^2 \leq 1 \quad (\text{Eq. 2})$$

Les premiers résultats pour $\eta = 0,65$ (valeur issue de la littérature, [10]) montrent un endommagement bien moins diffus et contenu dans les plis centraux comme observé expérimentalement (Fig. 5).

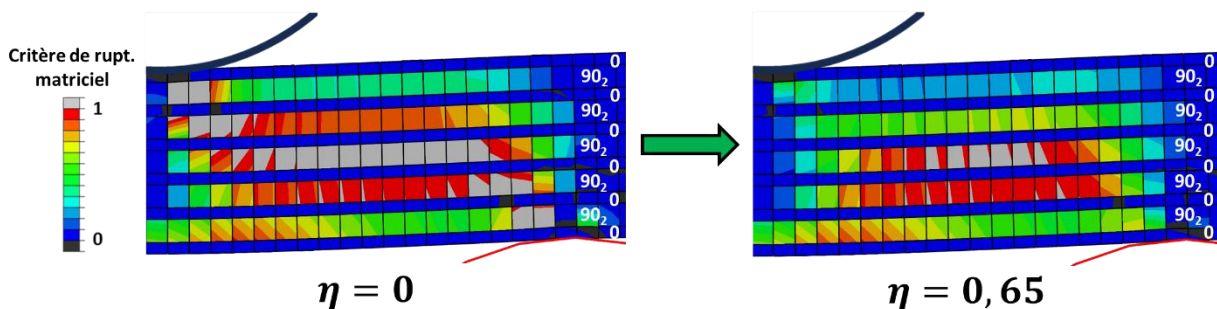


Fig. 5 : Premiers résultats obtenus sur un stratifié croisé $[(0/90_2)_2/0/90]_s$

5. Perspectives

Bien que par la prise en compte de l'influence des contraintes de compression le modèle arrive à mieux rendre compte des endommagements, certains points restent à améliorer. En effet, il a pu être observé un endommagement trop tardif sur d'autres stratifications telles que des quasi-isotropes. Il est donc plausible que, selon le drapage, une valeur de coefficient de renforcement doive être calculée. Un travail est donc en cours pour investiguer ces points-ci et améliorer le modèle. De plus, une validation du modèle sur des stratifications autres que croisées est également envisagée.

Références

- [1] M. Nicol, « Compréhension et modélisation de l'influence de l'ordre d'empilement sur les scénarios d'endommagement dans des composites stratifiés de plis unidirectionnels », Thèse, Université Paris-Saclay, 2023. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-04190137>
- [2] N. Hongkarnjanakul, « Modélisation numérique pour la tolérance aux dommages d'impact sur stratifié composite : de l'impact à la résistance résiduelle en compression », Thèse, Toulouse, ISAE, 2013. Disponible sur: <https://theses.fr/2013ESAE0037>
- [3] S. Abrate, *Impact on Composite Structures*. Cambridge University Press, 1998. doi: 10.1017/CBO9780511574504.
- [4] H. Y. Choi et F.-K. Chang, « A Model for Predicting Damage in Graphite/Epoxy Laminated Composites Resulting from Low-Velocity Point Impact », *Journal of Composite Materials*, vol. 26, n° 14, p. 2134-2169, déc. 1992, doi: 10.1177/002199839202601408.
- [5] *NF EN 2563*, juillet 1997. Disponible sur: <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-2563/serie-aerospaciale-plastiques-renforcees-de-fibres-de-carbone-stratifiees-uni/fa041545/9263>
- [6] C. Bouvet, B. Castanié, M. Bizeul, et J.-J. Barrau, « Low velocity impact modelling in laminate composite panels with discrete interface elements », *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46, n° 14-15, p. 2809-2821, juill. 2009, doi: 10.1016/j.ijstr.2009.03.010.
- [7] C. Bouvet, S. Rivallant, et J. J. Barrau, « Low velocity impact modeling in composite laminates capturing permanent indentation », *Composites Science and Technology*, vol. 72, n° 16, p. 1977-1988, nov. 2012, doi: 10.1016/j.compscitech.2012.08.019.
- [8] W. Cui, M. Wisnom, et M. Jones, « Effect of Through Thickness Tensile and Compressive Stresses on Delamination Propagation Fracture Energy », *Journal of Composites Technology and Research*, vol. 16, n° 4, p. 329-335, oct. 1994, doi: 10.1520/CTR10593J.
- [9] S. T. Pinho, C. G. Davila, P. P. Camanho, L. Iannucci, et P. Robinson, « Failure Models and Criteria for FRP Under In-Plane or Three-Dimensional Stress States Including Shear Non-Linearity », NASA/TM-2005-213530, févr. 2005. Disponible sur: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20050110223>
- [10] X. Li, S. R. Hallett, et M. R. Wisnom, « Predicting the effect of through-thickness compressive stress on delamination using interface elements », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, n° 2, p. 218-230, févr. 2008, doi: 10.1016/j.compositesa.2007.11.005.
- [11] S. Chaibi, « Prévion des endommagements induits par un impact basse vitesse/basse énergie au sein de matériaux composites stratifiés carbone-époxy de dernière génération », These de doctorat, Toulouse, ISAE, 2022. Disponible sur: <https://theses.fr/2022ESAE0043>
- [12] C. Bouvet, « Dommages d'impact sur stratifié composite », in *17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17)*, AMAC, Éd., Poitiers-Futuroscope, France, juin 2011, p. 206. Disponible sur: <https://hal.science/hal-00597428>
- [13] M. Renault, « Compression après impact d'une plaque stratifiée : étude expérimentale et modélisation éléments finis associée », These de doctorat, Nantes, 1994. Disponible sur: <https://theses.fr/1994NANT2117>
- [14] P. Shabani, L. Li, J. Laliberte, et G. Qi, « Enhanced LaRC05 failure criteria for investigating low-velocity impact on fiber-reinforced composites: An experimental and computational study », *Aerospace Science and Technology*, vol. 155, p. 109554, déc. 2024, doi: 10.1016/j.ast.2024.109554.
- [15] G. Catalanotti, C. Furtado, T. Scalici, G. Pitarresi, F. P. Van Der Meer, et P. P. Camanho, « The effect of through-thickness compressive stress on mode II interlaminar fracture toughness », *Composite Structures*, vol. 182, p. 153-163, déc. 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.09.014.
- [16] J. Salençon, *Handbook of Continuum Mechanics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001. doi: 10.1007/978-3-642-56542-7.