

## Etude du comportement à l'impact et à la compression après impact de stratifiés conçus par la méthode Double-Double

### *Study of the Impact and Compression After Impact behaviour of Double-Double Laminate*

Geoffrey Gisclon<sup>1,2</sup>, Pablo Navarro<sup>1</sup>, Jean-François Ferrero<sup>1</sup>, Olivier Dorival<sup>1</sup>, Steven Marguet<sup>1</sup>, Léonard Serrano<sup>2</sup>

1 : Université de Toulouse, Institut Clément Ader,  
UMR CNRS 5312, INSA/ISAE/Mines Albi/UPS,

3 Rue Caroline Aigle,  
31400, Toulouse, France

2 : Alten Sud-Ouest  
7 rue Alain Fournier  
31300, Toulouse

[geoffrey.gisclon@univ-tlse3.fr](mailto:geoffrey.gisclon@univ-tlse3.fr)

[Pablo.navarro@univ-tlse3.fr](mailto:Pablo.navarro@univ-tlse3.fr)

### Résumé

Cette étude concerne l'analyse expérimentale du comportement des stratifiés conçus par la méthode Double-Double « DD » sous chargement d'impact à basse vitesse et de compression après impact. L'impact sur structures composites est une des sources de dommage la plus courante et la plus pénalisante. En effet, la fragilité des matériaux composites les rend plus vulnérable à ce type de sollicitations (fissurations matricielles, ruptures de fibres, délaminage). La récente méthode de drapage Double-Double développé par S.Tsai [1] offre de nouvelles perspectives d'optimisation et de fabrication de pièces composites. Elle semble permettre une meilleure liberté dans le choix de la séquence d'empilement d'un stratifié. Le travail présenté vise à comprendre et quantifier les mécanismes clés d'endommagement de ces structures sous chargement d'impact. Les réponses à l'impact et post-impact sont comparés à celles des stratifiés traditionnels, en vue d'un remplacement potentiel et d'un gain de masse. Pour cela, des essais d'impacts au poids tombant et des essais de compression après impact sont réalisés. Les dommages sont observés à l'aide de tomographies RX.

### Abstract

This study deals with the low velocity impact and post-impact behavior of Double-Double laminates. Impact on composite structures is one of the most common and critical sources of damage. The brittleness of composite materials makes them more vulnerable to such type of loading (matrix cracking, fibre breakage, delamination). The recent Double-Double method developed by S.Tsai [1] offers new perspectives for design optimization and manufacturing. Double-Double method seems to allow a better freedom and a possible better optimization in a laminate choice. The work presented aims to understand and quantify the key damage mechanisms in these structures, as well as to compare impact and post impact response to traditional laminates, with a view to a potential replacement and weight saving. For this, drop-weight impact tests and compression after impact tests have been carried out.

**Mots Clés :** Impact basse vitesse, Compression après impact, stratifié Double-Double, tolérance aux dommages

**Keywords:** Low velocity impact, Compression after impact, Double-Double laminates, damage tolerance

## 1. Introduction

L'impact est l'une des sources de dommage les plus courantes et les plus pénalisantes pour les structures composites. En effet, la fragilité, l'hétérogénéité et la nature fortement architecturée de ces matériaux les rendent plus vulnérables à ce type de sollicitations. L'impact doit être étudié pour les structures stratifiées notamment dans le domaine de l'aéronautique car ils peuvent être critiques

notamment sur la tenue en compression. De nombreuses situations sont rencontrées : collision d'oiseaux, grêle, chute d'outils lors de la maintenance [2] ...

Les dommages d'impact couramment observés sont les fissurations matricielles intra laminaires, les fissurations inter laminaires (délaminages) et les ruptures de fibres [3-4]. Les premiers dommages qui apparaissent sont les fissurations de la matrice, celles-ci initient alors des délaminages qui sont très pénalisants pour la résistance à la compression des stratifiés [5-6]. Les mécanismes qui pilotent l'initiation et la propagation de ces dommages sont fortement influencés par l'architecture des composites.

Les mécanismes d'endommagement étant difficiles à reproduire avec des modèles simples, dans l'industrie, des modèles et des abaques empiriques conservateurs sont très souvent utilisés.

La méthode de conception Double-Double développée par Stephen W.Tsai et al [1] est un concept innovant de drapage des composites stratifiés avec pour objectif de simplifier leur fabrication comme leur conception. Le principe consiste à empiler des structures appelées « building blocks » comprenant 4 plis orientation  $[\pm\varphi/\pm\psi]$  [1], [7-8]. Ces angles sont définis en fonction des propriétés mécaniques voulues et sont compris entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ .

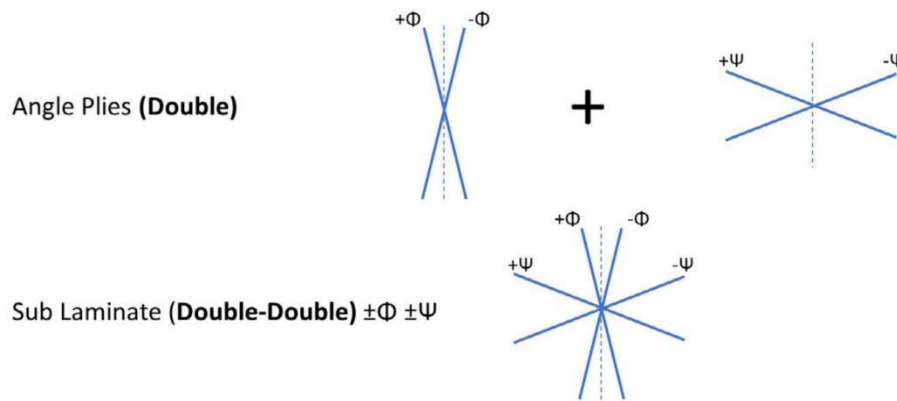


Figure 1. Principe général de la méthode Double-Double [1]

Cette méthode a été développée pour offrir plus de liberté dans le dimensionnement et permet de contourner les règles restrictives de drapage établies depuis les années 60. Une meilleure optimisation pour les structures composites semble possible car il devient ainsi plus simple de faire varier l'épaisseur d'un panneau en enlevant ou ajoutant un ou plusieurs « building block ».

Les stratifiés Double-Double sont différents des stratifiés traditionnels (nombre d'interfaces, différences d'angle entre plis, phénomène homogénéisation atteint rapidement...). En raison de leur architecture, le comportement à l'impact et à la compression après impact peut être différent du comportement des stratifiés traditionnels.

Certains travaux commencent voir le jour sur cette problématique. Cependant les recherches n'en sont qu'au début et aucune étude n'apporte de réelle conclusion. Une compréhension plus approfondie des mécanismes d'endommagement de ce type de stratifié est nécessaire [9-10-11].

## 2. Premiers travaux & résultats

Afin d'étudier le comportement des stratifiés Double-Double, plusieurs plaques ont été fabriquées en utilisant la méthode « Quad » (méthode traditionnelle ; empilement de plis à  $0, \pm 45, 90$ ) et la méthode DD. Le drapage Quad étudié est le suivant :  $[45/0_2/-45/90_2/45/0_3/-45/90]_s$ . Le drapage DD étudié est obtenu par conversion dit "iso-raideur plan"; la matrice de rigidité en membrane  $[A]$  est identique à celle du drapage Quad, le drapage est donc :  $[7,49/-64,62/64,62/-7,49]_{6T}$ . Une correspondance parfaite a été obtenue avec la matrice  $[A]$  et la matrice de rigidité en flexion  $[D]$  est quasi-similaires pour ces deux drapages ( 2% de différence sur le coefficient maximum de la matrice  $[D]$ ). Dans cette étude, le préimprégné Toray 2510, fibre P707AG-15 T700G a été utilisé. Les échantillons ont été testés pour des impacts à faible vitesse à l'aide d'un dispositif de poids tombant pour des vitesses d'impact comprises entre 3 et 5  $m.s^{-1}$ . L'impacteur se compose d'une masse de 2  $kg$  avec un embout hémisphérique de diamètre 16  $mm$ . Les éprouvettes sont de forme rectangulaire de dimensions  $150 \times 100 \times 3,6 \text{ mm}^3$ , appuyée sur une fenêtre de dimensions intérieures  $75 \times 125 \text{ mm}^2$ .

Ces impacts à faible vitesse sont caractéristiques des incidents dits « classiques » en atelier, comme les chutes d'outils sur les pièces ou les collisions lors du transport. Les éprouvettes ont ensuite été testées en compression afin de quantifier leur résistance résiduelle après impact. Les essais ont été réalisés selon les normes ASTM D7136/D7136M et ASTM D7137/7137M.

Les résultats à 4  $m.s^{-1}$  ont révélé une meilleure tenue résiduelle pour les échantillons Double-Double (figures 2 et 3). Les observations par tomographie à rayons X des surfaces délaminés mettent en évidence que les stratifiés DD ont une zone de délaminage projetée plus petite que les stratifiés Quad. Cela peut expliquer en partie les différences de comportement mesurées lors de la compression après impact. La tomographie à rayons X des échantillons Quad et DD est présentée dans la figure 4.

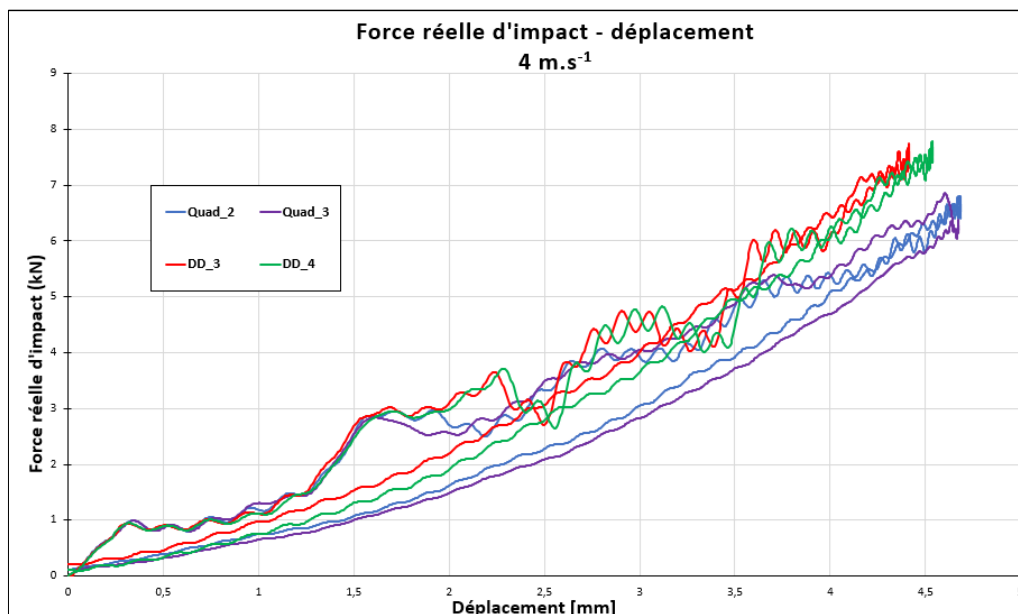


Figure 2. Résultats des impacts au poids tombant pour une vitesse de 4  $m.s^{-1}$  pour les stratifiés Quad & Double-Double

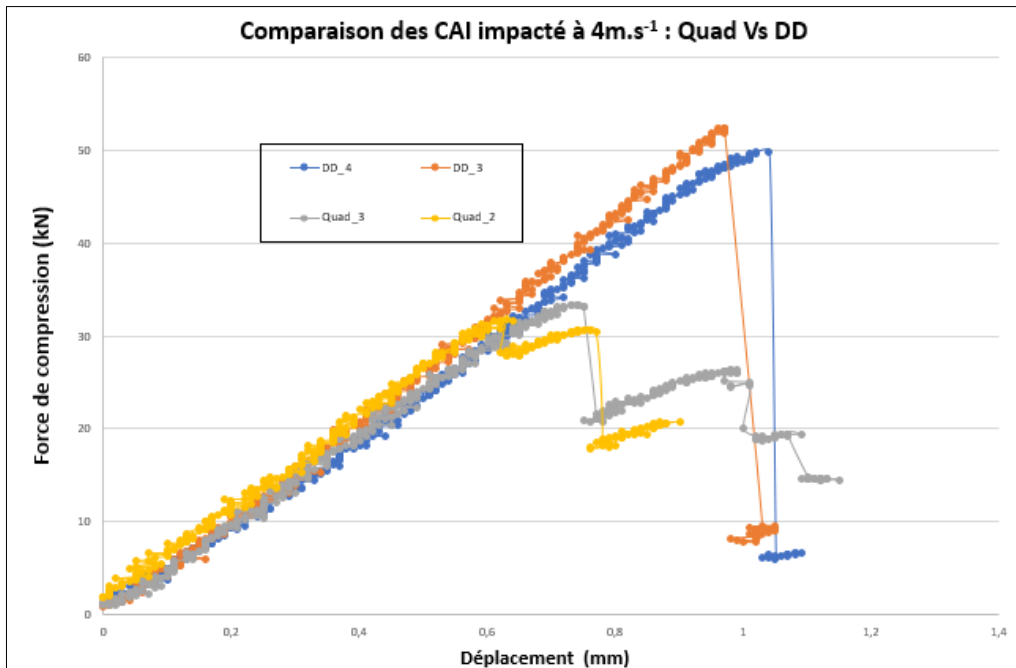


Figure 3. Résultats des compressions après impact pour les stratifiés Quad & Double-Double

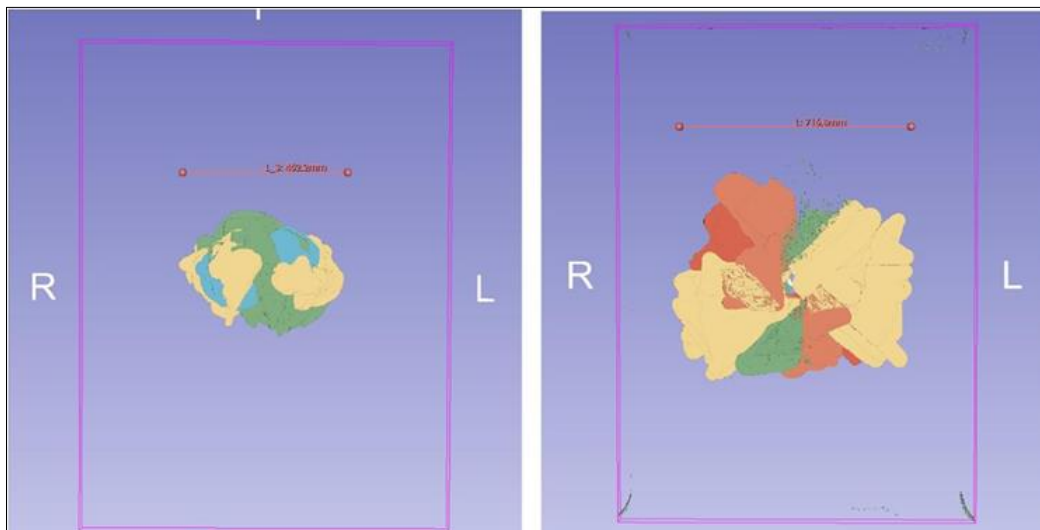


Figure 4. Surfaces délaminées après impact à  $4 \text{ m. s}^{-1}$  des stratifiés Double-Double (à gauche) & Quad (à droite)

Pour des vitesses supérieures ( $5 \text{ m. s}^{-1}$ ), la différence de comportement est moins marquée. Certaines éprouvettes ont montré des dommages plus importants que les éprouvettes Quad, tandis que d'autres ont montré l'inverse. De plus cette vitesse semble être une vitesse un peu trop importante pour étudier l'impact à basse vitesse et basse énergie par rapport à l'épaisseur des stratifiés étudiés ( $3,6 \text{ mm environ}$ ). Des perforations des éprouvettes ont été observés. Ainsi, de nombreuses investigations restent à mener pour comprendre plus précisément les mécanismes qui contrôlent l'apparition et la propagation des dommages lors d'un impact pour ce type de stratifié.

Dans cette étude, l'influence de l'épaisseur des stratifiés sera également présentée. L'effet de l'empilement du building block sur le comportement à l'impact sera également étudié (pour un couple  $\varphi$  et  $\psi$  donné, 4 empilements du building block sont possible).

## Références

- [1] S. W. Tsai, B. G. Falzon, and A. Aravand “*Double-double: Simplifying the Design and Manufacture of Composite Laminates*”, 2nd ed. Stanford University, Department of Aeronautics & Astronautics, 2023.
- [2] N. Hongkarnjanakul, “Modélisation numérique pour la tolérance aux dommages d’impact sur stratifié composite: de l’impact à la résistance résiduelle en compression”, Ph.D. dissertation, ISAE, Toulouse, France, 2013
- [3] S. Abrate “Impact on laminated composites: recent advances” *Applied Mechanical Review*, 47 (11), pp. 517-544, 1994.
- [4] J. Aboissière “Propagation de dommages d’impact dans un matériau composite stratifié à fibres de carbone et résine époxyde”, Ph.D. thesis, Université de Toulouse, 2003.
- [5] H. Choi, F. Chang “A model for predicting damage in graphite/epoxy laminated composites resulting from low-velocity point impact” *J Compos Mater*, 26, pp. 2134-2169, 1992.
- [6] P. Hu, “An experimental study on the influence of intralaminar damage on interlaminar delamination properties of laminated composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 131 (105783)
- [7] S. W. Tsai, “Double–Double: New Family of Composite Laminates”, *AIAA Journal*, vol. 59, issue 11, Nov. 2021, doi : 10.2514/1.J060659
- [8] T. Massard, “Opening the frontiers between manufacturing, materials and optimum design of composite structures”, Stanford University,
- [9] R. D. da Cunha, T. G. Targino, C. Cardoso, E. P. da Costa Ferreira, R. C. S. Freire Júnior, and J. D. D. Melo, "Low velocity impact response of non-traditional double-double laminates," *Journal of Composite Materials*, vol. 57, pp. 1807–1817, 2023
- [10] S. L. J. Millen, M. A. Aravand, Z. Ullah, and B. Falzon, "Studies on the impact and compression-after-impact response of 'Double-Double' carbon-fiber reinforced composite laminates," *Double-Double: Simplifying the Design and Manufacture of Composite Laminates*, pp. 161–180, 2023.
- [11] P. Shabani, L. Li, and J. Laliberte, "Low-velocity impact (LVI) and compression after impact (CAI) of Double-Double composite laminates," *Composite Structures*, 2024.