

# Analyse expérimentale et numérique du comportement des composites stratifiés réparés par patch soumis à un chargement de compression

A. MOKHTARI<sup>a</sup>, N. TALA-IGHIL<sup>a</sup>, K. BETTAHAR<sup>a</sup>, A. BRICK-CHAOUICHE<sup>a</sup>

a. Research Center in Industrial Technologies CRTI, P.O. Box 64, Cheraga 16014, Algeria  
[n.tala-ighil@crti.dz](mailto:n.tala-ighil@crti.dz)

## Résumé :

*Ce papier présente des résultats expérimentaux et numériques permettant d'examiner les formes déformées et les zones d'initiation de l'endommagement dans les composites stratifiés verre/époxy réparés par patchs. La partie expérimentale comprend des tests d'impact à faible vitesse sur trois réparations. Le comportement de ces stratifiés réparés a été identifié à l'aide de la technique de corrélation d'image (DIC) qui permet une visualisation quantitative de la répartition des déformations et les zones d'initiation des dommages. Une analyse éléments finies 3D a été effectuée permettant de déterminer la répartition des contraintes dans les zones critiques.*

## Abstract :

*This paper presents experimental and numerical results to examine deformed shapes and damage initiation areas in repaired glass/epoxy composite laminates by patches. The experimental part consists of low-speed impact tests on three repairs. The behavior of these repaired laminates was monitored using the Image Correlation Technique (DIC) to quantitatively view the strain distribution and the damage initiation areas. A 3D finite elements analysis was performed to determine the distribution of stresses in critical areas.*

**Mots clefs : Stratifié réparé, simulation, chargement de compression, endommagement, patch.**

## 1 Introduction

Les structures composites élaborées à partir de fibres de verre renforcées avec des matrices polymères ont une résistance à la compression considérablement inférieure lorsque des défauts (trous) sont présents. La dureté de la matrice polymère, les propriétés de l'interface matrice/fibre et la stabilité des fibres sont les principaux facteurs qui affectent la résistance à la compression des stratifiés comportant un défaut. L'importance de ces facteurs entraîne des modes d'endommagement complexes qui impliquent la fissuration de la matrice, le délaminage, le flambement local et la rupture par cisaillement. L'importance de l'analyse de la tolérance aux dommages des matériaux composites a été démontrée par de nombreux auteurs [1]. Une approche a été présentée par Wang [2] liée au problème de délaminage des bords des stratifiés composites. Davis et Jones [3] ont examiné l'effet des défauts de fabrication sur la rupture des structures en composites. Une étude expérimentale et numérique sur les contraintes résiduelles dans les stratifiés composites soumis à une charge d'impact a été effectuée par les auteurs [4]. L'évolution progressive de l'endommagement dans les stratifiés sous chargement de compression contenant un trou circulaire a été étudiée expérimentalement [5], il a été observé que la rupture est initiée à l'instabilité localisée à la surface du bord du trou. Le délaminage a été observé avec l'augmentation de la charge. Les régions délaminées progressent sur les zones non-endommagées du stratifié par une combinaison du délaminage, du flambage et de la croissance des dommages. Le flambage augmente encore la croissance des dommages.

Dans cet article, des essais de compression ont été effectués sur trois variantes d'éprouvettes, CD8R, CD16R et CD24R. Le but est d'étudier le comportement des composites troués réparés sous chargement de compression. Dans cette optique, deux approches expérimentale et numérique ont été élaborées. L'approche expérimentale vise à quantifier la réponse globale et les mécanismes d'endommagement des stratifiés. L'approche numérique, quant à elle, vise à développer un outil numérique fidèle capable de prédire la résistance et le comportement de ces stratifiés. Pour la simulation, le dommage a été modélisé par l'utilisation combinée du Modèle de Zone Cohésive [6] (CZM) qui permet de simuler au mieux le phénomène de décollement sans frottement et la méthode de RIKS modifiée qui est utilisée pour le post-flambement [7].

## 2 Expérimental

Les essais de compression verticale ont été effectués sur des stratifiés troués réparés. Les différents types d'échantillons considérés dans l'essai de compression sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Différents types d'échantillons utilisés.

Echantillons	Plaque trouée		Plaque trouée réparée	
	Orientation	Diamètre du trou	Orientation	Diamètre du patch
C00D8R	$[0^\circ, 90^\circ]_{4S}$	$d_t=08\text{mm}$	$[0^\circ, 90^\circ]_{4S}$	$d_p=32\text{mm}$
C45D8R	$[45^\circ, -45^\circ]_{4S}$	$d_t=08\text{mm}$	$[45^\circ, -45^\circ]_{4S}$	$d_p=32\text{mm}$
C00D16R	$[0^\circ, 90^\circ]_{4S}$	$d_t=16\text{mm}$	$[0^\circ, 90^\circ]_{4S}$	$d_p=40\text{mm}$
C45D16R	$[45^\circ, -45^\circ]_{4S}$	$d_t=16\text{mm}$	$[45^\circ, -45^\circ]_{4S}$	$d_p=40\text{mm}$
C00D24R	$[0^\circ, 90^\circ]_{4S}$	$d_t=24\text{mm}$	$[0^\circ, 90^\circ]_{4S}$	$d_p=48\text{mm}$
C45D24R	$[45^\circ, -45^\circ]_{4S}$	$d_t=24\text{mm}$	$[45^\circ, -45^\circ]_{4S}$	$d_p=48\text{mm}$

La figure 1a montre le dispositif utilisé afin de maintenir et d'empêcher la rotation des éprouvettes trouées réparées. Les trois variantes CD8R, CD16R et CD24R considérées pour l'essai de compression sont représentées sur la figure 1b.

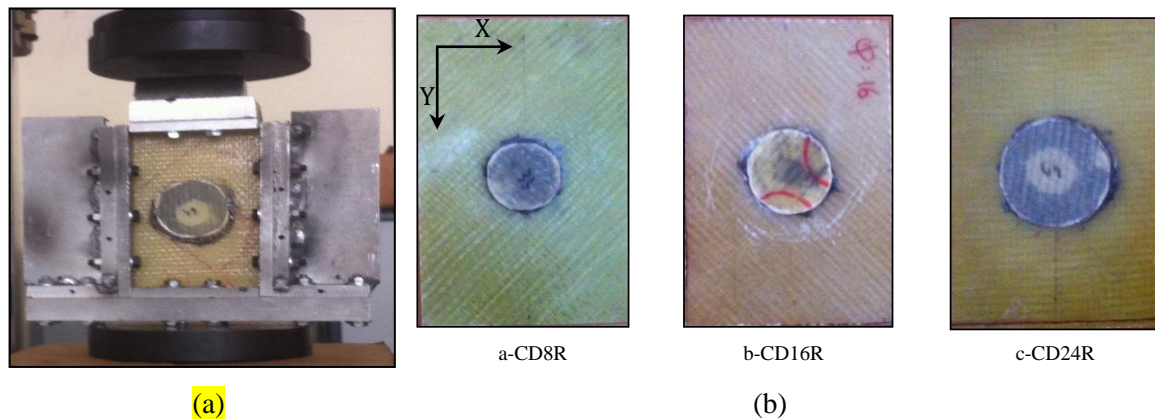


Figure 1 : (a) Dispositif pour les tests de compression (b) Eprouvettes trouées et réparées utilisées pour l'essai de compression.

Ces tests ont été réalisés grâce à une machine de compression IBERTEST de capacité 500KN. Les essais ont été réalisés suivant la norme ASTM D7137. Toutes les échantillons ont été testées sous compression uni axiale avec une machine d'essai type IBERTEST, équipée d'une chaîne d'acquisition et de contrôle numérique. Les forces et les déplacements axiaux pour chaque échantillon ont été ainsi obtenus. Les tests ont été réalisés à une vitesse de chargement de 1mm/min. Les échantillons ont été sollicités jusqu'à la rupture. Les courbes forces-déplacements ainsi obtenues permettent d'estimer les paramètres des stratifiés et les formes des déformées. La figure 2 résume les courbes force-déplacement obtenues suite aux essais de compression effectués.

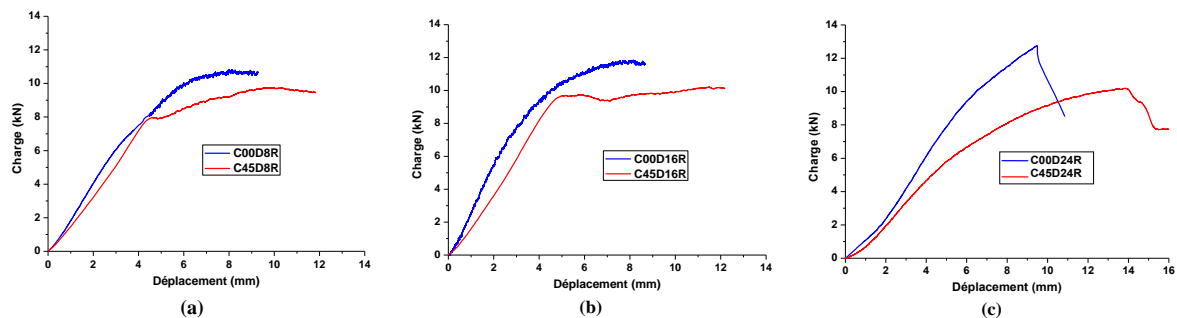


Figure 2 : Courbes forces-déplacements expérimentales obtenues pour les stratifiés : a) C00D8R & C45D8R, b) C00D16R & C45D16R et c) C00D24R & C45D24R.

La technique de corrélation d'images est utilisée pour mesurer les déformations induites. Cette technique permet de visualiser non seulement les champs de déformation et de vitesse, mais permet également de déterminer les zones critiques endommagées dans les stratifiés. La mesure du déplacement longitudinal  $U_y$  (direction du chargement) par corrélation d'images est effectuée sur le contour supérieur du Patch correspondant à la déformation maximale (zones rouges de la figure 6).

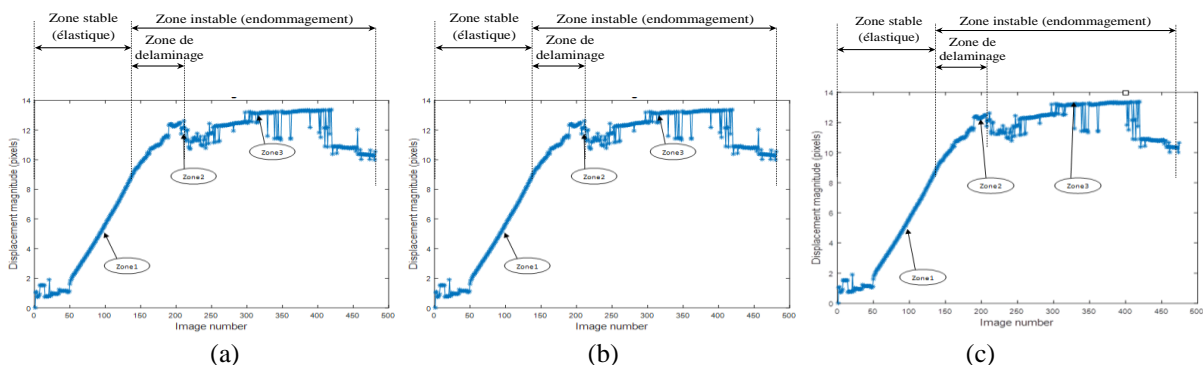


Figure 3 : Courbes de déplacements obtenues par la corrélation d'images de l'essai de compression sur le stratifié a) C00D8R, b) C00D16R et c) C00D24R.

Les résultats de mesure des déformations équivalentes par la technique de corrélation d'images sur les stratifiés troués réparés C00D8R, C00D16R et C00D24R sont représentés sur la figures 3. Le comportement des stratifiés comporte deux phases, une stable et l'autre instable. La phase stable est caractérisée par un champ de contraintes et de déformations uniformes (domaine élastique) et la phase instable qui est caractérisée par l'initiation et l'évolution de l'endommagement. L'apparition de l'endommagement et des fissures. L'initiation des fissures est gouvernée à la fois par la résistance et la ténacité et la propagation peut être soit stable ou instable (en fonction de la géométrie).

### 3 Simulation

Les essais de compression effectués sur les stratifiés C00D8R, C00D16R et C00D24R ont été simulés numériquement. Les calculs éléments finis ont été réalisés en utilisant le logiciel de calcul Abaqus. La méthode modifiée de Riks [7] est utilisé pour prédire le flambage des stratifiés troués réparés. Les principaux mécanismes d'endommagement apparaissant durant l'essai de compression sur les stratifiés sont : l'endommagement intra-laminaire (la fissuration de la matrice et la rupture des fibres), l'endommagement inter-laminaire (décollement du patch) et le flambage des éprouvettes. Afin de simplifier le problème, seuls les décollements du patch et le flambage de l'éprouvette sont considérés. Il est important que la simulation prédise avec précision les zones endommagées et la forme déformée. Le décollement du patch a été simulé par le modèle de zones cohésives (MZC) et le flambage a été simulé par le modèle de Riks pour prendre en compte les non-linéarités géométriques (grandes déformations). Pour les besoins de la simulation, les propriétés élastiques des stratifiés utilisées dans le code de calcul éléments finis, sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Propriétés mécaniques du stratifié troué et du patch.

Propriétés	$E_1=E_2$ (MPa)	$E_3$ (MPa)	$G_{12}$ (MPa)	$G_{13}$ (MPa)	$G_{23}$ (MPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$
Valeurs	144700	9650	5200	5200	3400	0.3	0.3	0.3

La géométrie et les conditions aux limites appliquées sur les stratifiés troués réparés sont représenté sur la figure 4. Pour des raisons de symétrie dans les deux directions ( $OX$ ) et ( $OY$ ), seul un quart de l'éprouvette est maillé. Les conditions aux limites imposées sur les stratifiés ont été fixés de telle sorte que les modèles éléments finis ressemblent aux conditions réelles de l'essai expérimental. Il faut tenir compte de la présence du guide anti-flambage, ce qui conduit à imposer la nullité des déplacements  $U_x$  et  $U_z$  situés sur les faces du guidage gauche et droite.

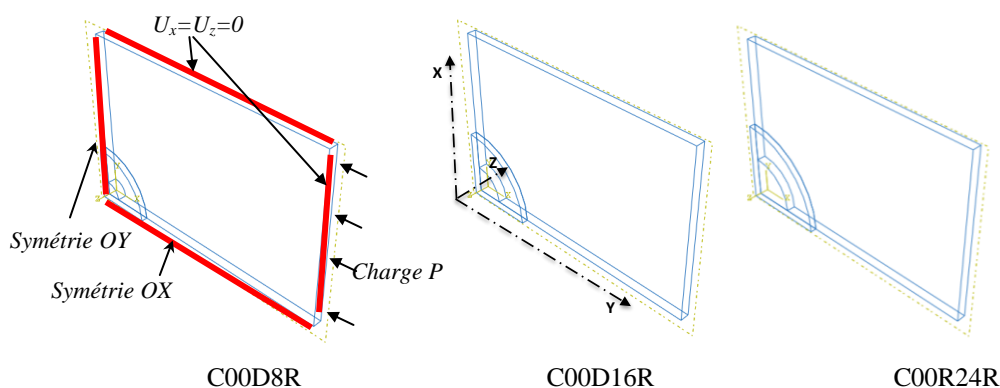


Figure 4 : Géométries et conditions aux limites des stratifiés troués réparés.

La figure 5 représente les maillages utilisés correspondant aux trois échantillons troués réparés.

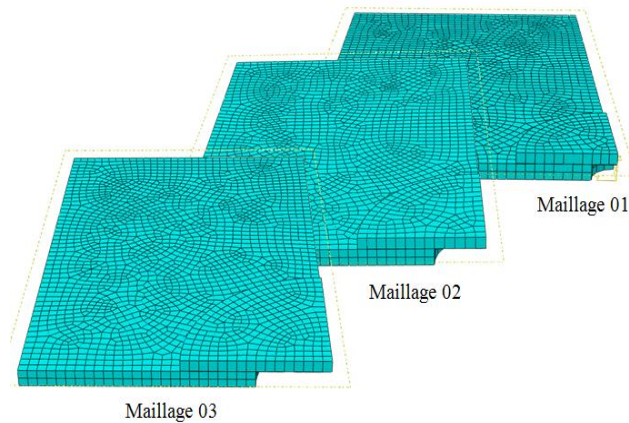


Figure 5 : Maillages éléments finis utilisés pour les simulations : C00D8R (maillage 1), C00D16R (maillage 2) et C00D24R (maillage 3).

Le modèle numérique spécifié est constitué de 08 couches (verre/époxy) d'épaisseur 1.9 mm pour tous les modèles éléments finis. Le type d'élément utilisé pour la simulation des plis ( $0^\circ/90^\circ$ ) et ( $\pm 45^\circ$ ) est l'élément SC8R. L'interface est modélisée avec des éléments COH3D8.

Les simulations révèlent une forte concentration de contraintes qui se développe au centre du stratifié (voisinage du patch). Ces concentrations de contraintes sont liées à la présence du défaut sur le stratifié. Les figures 6aI, 6bI et 6cI représentent le contour de la zone d'initiation l'endommagement à différents niveaux de chargement obtenu sur l'interface stratifié/patch. La zone de concentration de contraintes atteint l'état de saturation et cela provoque l'initiation de l'endommagement au bord libre du patch.

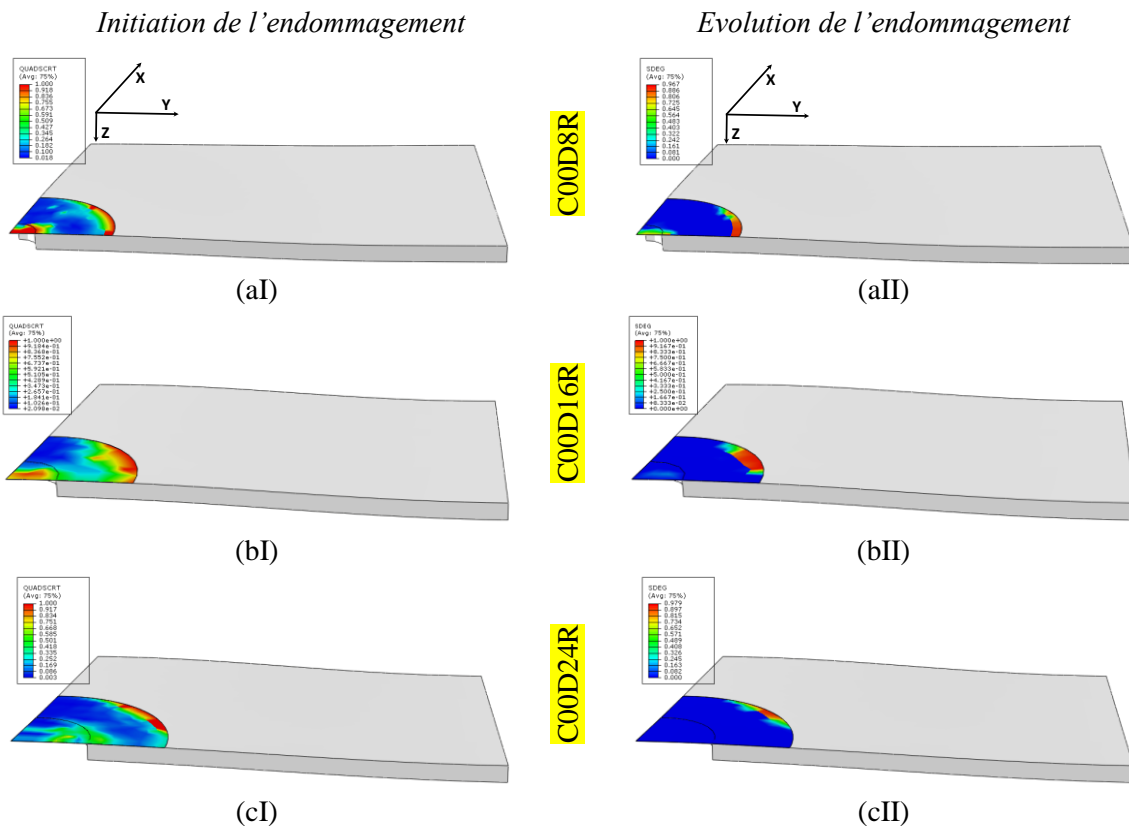


Figure 6 : Initiation et évolution de l'endommagement à l'interface stratifié/patch prédite par le modèle élément finis sur les différents stratifiés considérés.

Les figures 6aII, 6bII et 6cII représente le contour de la zone de l'évolution d'endommagement à différents niveaux de chargement obtenu sur l'interface stratifié/patch. Ces zones d'endommagement donnent un contour d'endommagement réparti uniformément sur le bord libre du patch. Comme la charge augmente graduellement et s'étend jusqu'au déplacement imposé, le stratifié commence à se flamber à partir d'un certain temps au centre et se propage vers les côtés. De plus, la zone décollée et la forme déformée sont de même répartition quantitative que celle de l'expérimentale, ce qui suggère que des mécanismes importants ont été bien pris en charge.

Les résultats obtenus montrent que le code Abaqus/Standard est un outil de calcul permettant la prévision des différents phénomènes mis en jeu lors de la compression des plaques composites trouées réparées présentant un flambement localisé et un décollement du patch.

L'introduction des non-linéarités géométriques dans le calcul éléments finis est nécessaire à l'analyse du flambement et post-flambement, la prise en compte des non-linéarités physiques de type endommagement est essentiel à la prédiction de l'initiation de la macro-fissuration, elle-même responsable de l'évolution du décollement des patches. Il est apparu que ce dernier était sans influence notable sur **le comportement global des stratifiés troués réparés.**

## 4 Conclusion

Les résultats obtenus suite aux essais de compression réalisés sur des stratifiés (CD8R, CD16R et CD24R) troués réparés par patch, ont mis en évidence l'influence de la taille et de l'orientation des fibres sur la réponse mécanique et l'endommagement des stratifiés verre/époxy. Les résultats de la corrélation d'images et de la simulation numérique ont permis d'identifier avec précision l'initiation et l'évolution de l'endommagement à l'interface stratifié/patch. La procédure expérimentale de l'essai de compression sur les stratifiés étudiés a permis d'établir une cartographie sur la cinématique d'endommagement d'un stratifié réparé. Les essais ont permis de mettre en évidence une cinétique à trois phases d'endommagement :

- Une première phase linéaire est caractérisée par une augmentation très lente et constante de l'endommagement diffus.
- Une deuxième phase où il y a des décollements des patches, ce mode d'endommagement est provoqué par le flambage local ou global des stratifiés.
- Une dernière phase qui est caractérisée par une croissance très rapide de la rupture entraînant ainsi la ruine totale du composite réparé.

Les résultats numériques obtenus sont proches de ceux de l'expérimental et le modèle peut reproduire les formes déformées axisymétrique et le délaminage du patch. Le modèle de zones cohésives a démontré sa capacité à reproduire les dommages complexes observés à l'interface stratifié/patch. Les simulations ont aidé à acquérir une meilleure compréhension des dommages complexes survenus à chaque niveau de chargement.

## Références

- [1] J.W. Mar. Fracture, longevity, and damage tolerance of graphite/epoxy filamentary composite material. *J. Aircraft*. 21 (1) (1984) 77-83.
- [2] S.S. Wang. Fracture mechanics for delamination problems in composite materials. *J. Composite Materials*. 17 (1983) 210-223.
- [3] M.J. Davis and R. Jones. Damage tolerance of fiber composite laminates. G.C. Sih et al., *Fracture Mechanics Technology Applied to Material Evaluation and Structure Design*, Martinus Nijhoff, Leiden (1978).
- [4] G.E. Husman, J.M. Whitney and J.C. Halpin. Residual strength characterization of laminated composites subjected to impact loading. *Foreign Object Impact Damage to Composites*, ASTM STP 568, American Society for Testing and Materials (1975) 92-113.
- [5] A. M. Waas, C.D. Jr. Babcock and W. G. Knauss. Damage Progression in Compressively Loaded Laminates Containing a Circular Cutout. *AIAA Journal*. 29 (3) March (1991) 436-443.
- [6] M. Benzeggagh and M. Kenane. Measurement of Mixed-Mode Delamination Fracture Toughness of Unidirectional Glass/Epoxy Composites with Mixed-Mode Bending Apparatus. *Composite Science and Technology* 56 (1996) 439-449.
- [7] E. Riks. An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems, *Int. J. of solids and structures*, 15 (1979) 524- 551.