

## Evaluation de l'effet de courbure sur la rupture en compression de composite carbone/epoxy via l'essai de compression rotulée.

## Evaluation of the strain gradient effect on compressive failure of CRFP composites

Tobias Bianchi<sup>1</sup>, Christophe Bouvet<sup>1</sup>, Joël Serra<sup>2</sup>

1 : Institut Clément Ader (UMR 5312),  
ISAE-SUPAERO – INSA – IMT Mines Albi – UPS – CNRS, Toulouse, France  
e-mail : tobias.bianchi@isae.fr, christophe.bouvet@isae.fr

2 : Nantes Université, IRT Jules Verne, F-44000 Nantes, France  
Institut de Recherche Technologique Jules Verne,  
1 Mail des 20 000 Lieues, 44340 BOUGUENNAIS, France  
e-mail : joel.serra@irt-jules-verne.fr

### Résumé

Un montage de compression rotulée, inspiré de celui de Wisnom (M. Wisnom, 1992), a été conçu pour examiner l'influence du gradient de déformation -courbure- sur la tenue en compression. Le matériau étudié est un composite unidirectionnel (UD) carbone/époxy AS4/8552. Des drapages cross-plys - [(0/90)<sub>2</sub> ]s, [(0/90)<sub>4</sub> ]s, [(0/90)<sub>8</sub> ]s- ainsi que des drapages unidirectionnelles [0]<sub>8</sub> et [0]<sub>16</sub> ont été testées pour analyser l'impact de l'épaisseur des échantillons sur la déformation à rupture en compression. Les déformations sont obtenues via de la stéréo corrélation d'images. La plupart des échantillons ont cassé sur la face en traction, en raison de la résistance élevée en compression induite par le gradient de déformation, tandis que la déformation à rupture en traction est restée inchangée par la courbure. Pour provoquer la rupture sur la face en compression, une approche innovante a été adoptée en ajoutant un pli d'aluminium 2024 sur la face supérieure en traction des échantillons. Cela a entraîné une rupture de tous les échantillons bi matériau sur la face en compression. Les résultats ont révélé une relation non linéaire entre la déformation à rupture en compression et le gradient de déformation, à la différence de la tendance linéaire observée par Wisnom. De plus, pour les échantillons les plus minces, des valeurs allant jusqu'à -33000 micro-déformations ont été obtenues, soit plus de 2,5 fois la déformation à rupture en compression de -12 500 micro-déformations.

### Abstract

A pin-ended buckling test, inspired by Wisnom (M. Wisnom, 1992), was designed to examine the influence of strain gradients on the compressive failure strain of composite laminates. The study focused on unidirectional (UD) carbon/epoxy AS4/8552, with strain measurements obtained via digital image correlation. Cross-ply stacking sequences—[(0/90)<sub>2</sub> ]s, [(0/90)<sub>4</sub> ]s, [(0/90)<sub>8</sub> ]s—as well as unidirectional configurations [0]<sub>8</sub> and [0]<sub>16</sub> were tested to explore the impact of specimen thickness on compressive failure strain. Most specimens failed on the tension side, driven by the high compressive strength induced by the strain gradient, while the tensile failure strain remained unaffected. To provoke failure on the compression side, an innovative approach was employed by adding an aluminum 2024 ply to the top tension side of bi-material specimens, resulting in all specimens failing on the compression side. The findings revealed a non-linear relationship between compressive failure strain and the strain gradient, contrasting with Wisnom's linear trend. Furthermore, we've obtained for the thinner specimens, values that go up to -33000 micro strains, which is more than 2.5 times the compressive failure of -12500 micro strains.

**Mots Clés :** Rupture en compression., Courbure, Kink-band., Compression rotulée.

**Keywords :** Compressive failure, Curvature, Kink-band, Pin-Ended buckling test.

### 1. Introduction

Diverses méthodes d'essais en compression ont été développées pour évaluer les propriétés mécaniques des composites sous compression. La norme ASTM D3410 a été la première

développée pour caractériser la tenue en compression de composites [1], adaptée des normes sur les métaux. Cependant, cette méthode présente de nombreux inconvénients, tels que des ruptures prématurées au niveau des mors de l'échantillon, dues aux concentrations de contraintes, une grande variabilité des résultats [2] et le flambement des échantillons, ce qui la rend difficilement reproductible. Pour résoudre ces problèmes, l'ASTM D695 a introduit un dispositif anti-flambement. Cela a inspiré plusieurs travaux comme [3],[4] qui ont utilisé un dispositif similaire appelé ICSTM. Bien que ce dispositif limite le flambement, il complique la mesure des déformations. Plus récemment, des méthodes innovantes, telles que celle développée par [5], évaluent la tenue en compression via des essais de traction, en utilisant l'effet Poisson pour charger des plis à 90° en compression. Bien que cette approche résolve certains défis antérieurs, elle nécessite des empilements spécifiques où les premiers dommages surviennent dans le pli à 90°, rendant sa mise en œuvre complexe.

Plusieurs méthodes de caractérisation en compression utilisent des montages de flexion pour éviter les difficultés précédentes. L'essai de flexion trois points fournit une première solution. Il a été utilisé par [6] pour déterminer la résistance en compression des composites CFRP. Son principal inconvénient est que la contrainte maximale en compression se situe directement sous le rouleau de charge. Cela rend les mesures précises difficiles et introduit un effet localisé du rouleau qui perturbe le test. Un deuxième inconvénient, particulièrement lorsqu'on vise une compression pure, est la présence d'une force de cisaillement non nulle dans la flexion trois points. L'essai de flexion quatre points permet de réduire certains inconvénients de la flexion trois points, mais la rupture reste localisée près des points de chargement.

Un point commun des méthodes utilisant des montages de flexion est que les déformations à la rupture en compression sont généralement plus élevées que lors des essais de compression pure. Cela peut s'expliquer en partie par la présence d'un phénomène qui se produit lorsqu'un composite est soumis à de la compression avec courbure, typiquement lors de la flexion, connu sous le nom d'effet de gradient de déformation. Wisnom a développé un dispositif de compression rotulée [7] qui présente l'avantage de ne pas utiliser de rouleaux, comme dans les essais de flexion trois ou quatre points, évitant ainsi les concentrations de contraintes proche de la zone de rupture.

L'objectif de cette étude est d'analyser l'effet du gradient de déformation sur le matériau composite en fibres de carbone AS4/8552. Plus précisément, nous étudions l'influence de l'épaisseur des échantillons en testant des échantillons d'épaisseurs de 1,5 mm, 3 mm et 6 mm. Pour réaliser cette analyse, un dispositif expérimental a été conçu, inspiré des travaux de Wisnom [7]. La Figure 1 montre le dispositif avec un échantillon monté. Pour introduire une excentricité initiale, des cales de différentes épaisseurs sont utilisées lors de la fixation de l'échantillon au dispositif. Cette excentricité génère un moment dès le début du chargement, provoquant une flexion de l'échantillon dans la direction souhaitée.

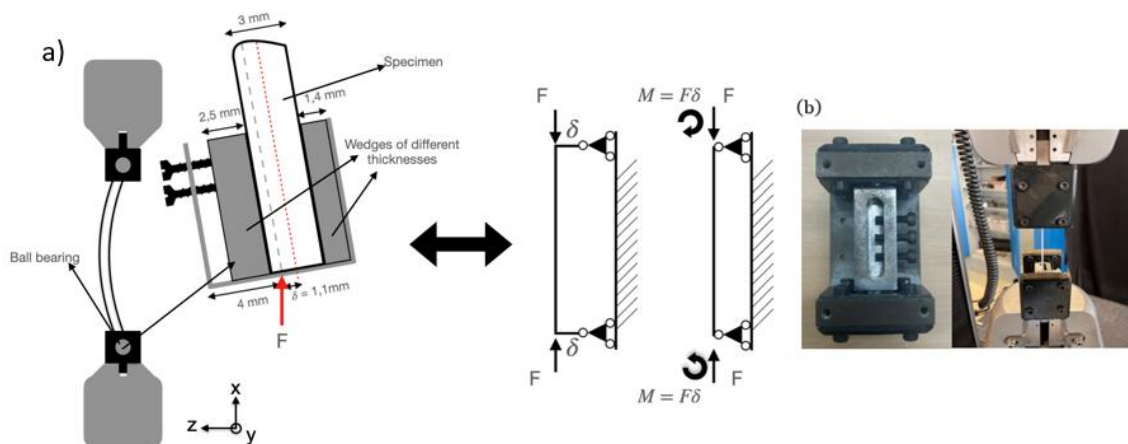


Figure 1 : (a) Schéma du montage de compression rotulée, (b) photo du montage.

## 2. Méthodologie.

Le matériau utilisé est un préimprégné carbone/époxy unidirectionnel (UD) AS4/8552 de Hexcel, dont l'épaisseur d'un pli est de 0,185 mm. Les drapages fabriqués sont des cross-plys  $[(0/90)_N]_S$ , où  $N=\{2,4,8\}$ , permettant ainsi d'obtenir des échantillons de 8, 16 et 32 plis pour évaluer l'effet du gradient de déformation sur notre matériau. De plus de drapages  $[0]_8$  et  $[0]_{16}$  ont également été préparés, afin de comparer avec les drapages testés WIS. Le cycle de polymérisation standard recommandé par le fabricant a été utilisé, conformément à la fiche technique de Hexcel, applicable aux composites monolithiques. Une fois le cycle terminé, les échantillons de dimensions 100 mm × 20 mm ont été découpés à l'aide d'une machine de découpe par jet d'eau. Pour les échantillons bi matériau, une couche d'aluminium 2024 de 2 mm d'épaisseur a été collé avant la découpe des échantillons. Afin de garantir une fixation solide entre les couches de composite et d'aluminium pendant les essais, l'adhésif HexBond ST035 a été utilisé. Un motif pour la corrélation d'images numériques (DIC) a été appliqué sur une face de l'échantillon à l'aide d'une peinture en spray à base d'acrylique. Deux campagnes ont été réalisées. La première concernait des échantillons composites classiques, et la deuxième portait sur les échantillons hybrides composés de composite et d'aluminium 2024.

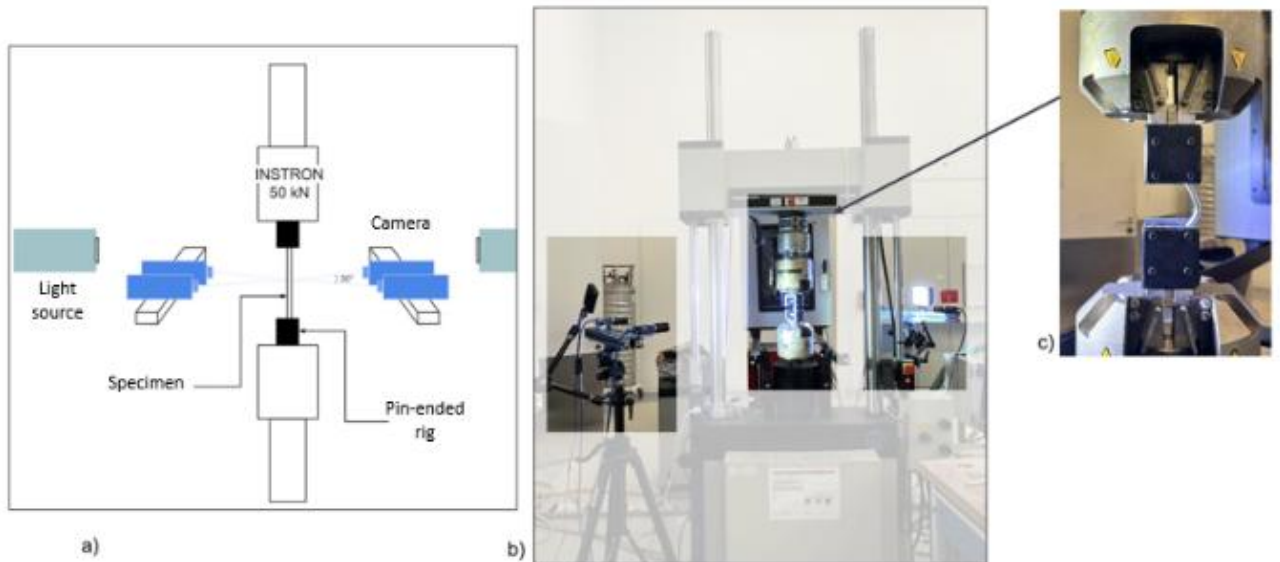


Figure 2 : (a) Schéma du dispositif expérimental, (b) photo du montage expérimental.

En utilisant les résultats de la corrélation d'images numériques (DIC), nous pouvons déterminer la déformation maximale en compression et la déformation maximale en traction. Ensuite, nous obtenons le gradient de déformation  $k_0^x$ , défini comme :

$$k_0^x = \frac{e_t^{max} - e_c^{max}}{e}$$

Lors de la deuxième campagne de tests, pour calculer le gradient de déformation, nous nous sommes appuyés sur le déplacement hors-plan, car la déformation en traction n'était plus mesurée. À partir des résultats de la corrélation d'images numériques (DIC), nous traçons le déplacement hors-plan le long de l'éprouvette,  $w(x)$ . Ensuite, nous utilisons la relation entre  $k_0^x$  et  $w(x)$  :

$$k_0^x = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$

### 3. Résultats expérimentaux.

Lors de la première campagne d'essais les échantillons de 8 et 16 plis ont tous cassé sur la face traction pour une valeur de 17000 . Tandis que, les éprouvettes de 32 plis ont cassé sur la face en compression. La Figure 3 présente deux courbes Force/Déplacement obtenues.

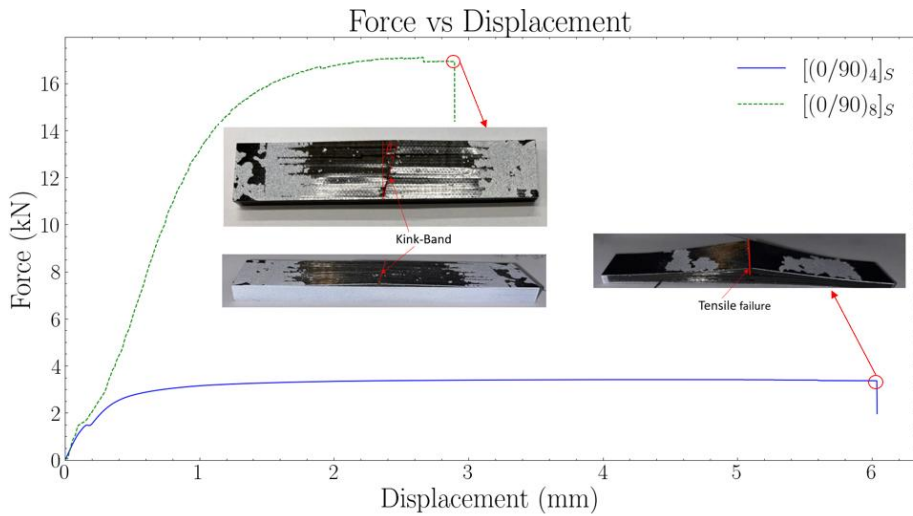


Figure 3 : Courbe Force/Déplacement obtenue lors du chargement de compression rotulée.

Cela peut s'expliquer par l'effet du gradient de déformation sur la face en compression. Au fur et à mesure de l'augmentation de la charge, les éprouvettes de 8 et 16 plis ont présenté un gradient de déformation plus élevé par rapport aux éprouvettes de 32 plis, en raison de leurs profils plus fins. Dans le cas des éprouvettes de 8 et 16 plis, cet effet était si prononcé qu'elles ont finalement rompu sous une contrainte en traction. Cela se voit lorsque l'on trace la répartition des contraintes dans l'épaisseur avant la rupture finale pour une éprouvette de 16 plis et une de 32 plis, illustré dans la Figure 4. La position de la fibre neutre des éprouvettes à 32 plis, par rapport à celle des 16 plis, souligne l'importance de l'effet de l'épaisseur sur le mode de rupture finale.

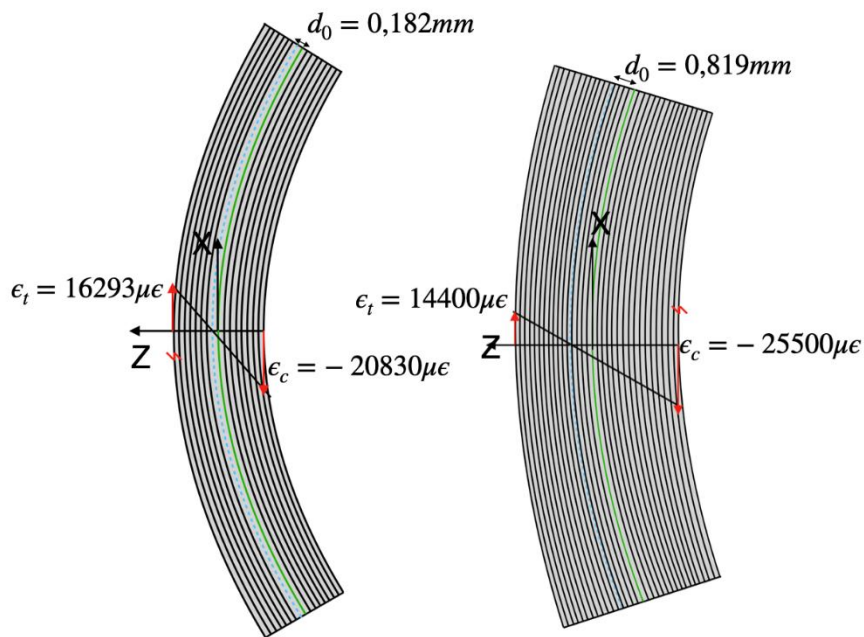


Figure 4 : Répartition des déformations dans l'épaisseur avant la rupture finale.

Ce raisonnement sur la fibre neutre, nous mène à l'idée de fabrication d'éprouvette bi matériau en ajoutant une plaque d'aluminium sur la face supérieure de notre éprouvette. L'ajout de cette couche d'aluminium déplacera la position de l'axe neutre, entraînant des déformations plus faibles dans la couche composite soumise à la traction. L'objectif est que, grâce à l'ajout de la plaque d'aluminium, la couche chargée en compression cède avant la couche chargée en traction, malgré l'effet du gradient de déformation. La Figure 5 compare deux courbes efforts déplacement.

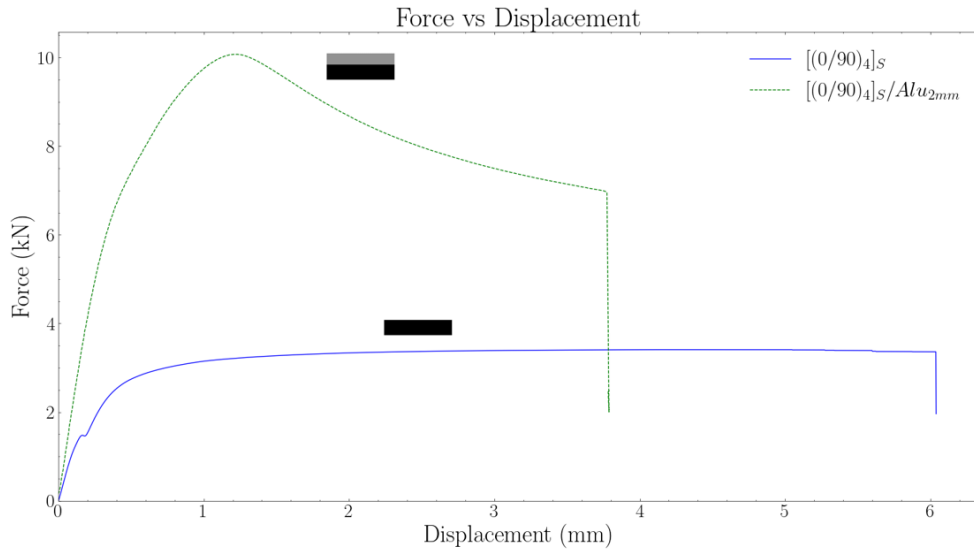


Figure 5 : Courbe Force/Déplacement pour éprouvette bi matériau.

Nous remarquons une chute notable de la force pour l'éprouvette bi-matériau. Cela est dû au fait que l'aluminium commence à couler. Pour confirmer cela, plusieurs essais de traction ont été réalisés sur l'aluminium conformément à la norme ASTM B557. Ces essais ont été effectués sur la même machine avant le début de la campagne. La contrainte à la limite d'élasticité a été identifiée, confirmant que la chute de force est bien due à la plastification de l'aluminium. La plastification de la plaque d'aluminium n'affecte pas notre méthode de post-traitement, car nous analysons les déformations. En supposant que les déformations restent linéaires tout au long de notre essai, l'obtention des déformations maximales en compression et de la courbure n'est pas influencée par l'aluminium. La Figure 6 résume les points de rupture obtenus.

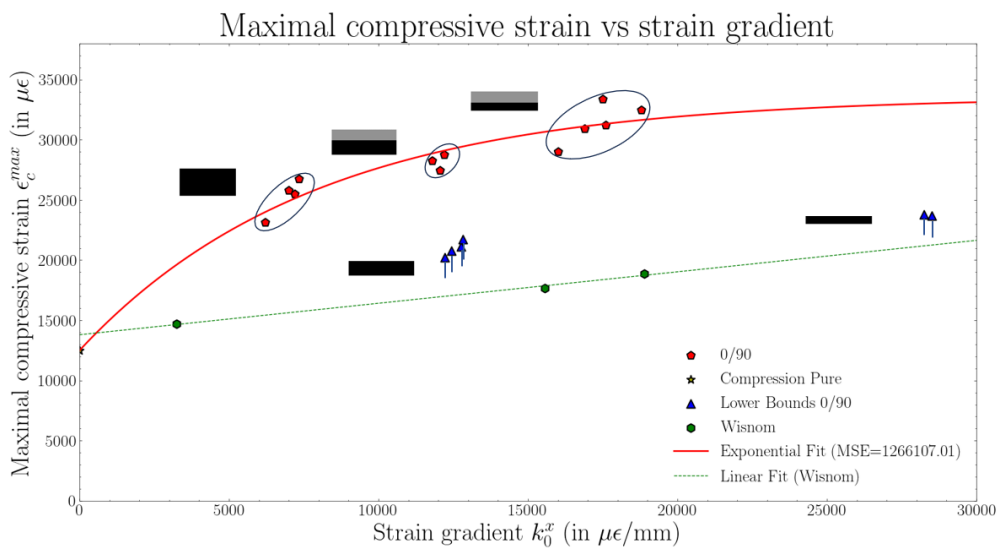


Figure 6 : Loi de l'évolution de la contrainte maximale en compression en fonction de la courbure.

Plusieurs conclusions peuvent être tirées. Tout d'abord, comme prévu, le composite AS4/8552 montre un effet de gradient de déformation plus élevé que le T800/924 utilisé dans [7]. De plus, les nouveaux points de rupture ne semblent pas suivre une tendance linéaire. Ainsi, une loi plus appropriée serait une loi exponentielle de premier ordre :  $A_{\infty}(1 - e^{-t/\tau}) + \epsilon_c^0$ . Dans cette équation,  $A_{\infty}$  peut être interprété comme une valeur asymptotique, une limite de déformation que la fibre ne peut pas dépasser en compression. Réaliser des essais à des gradients de déformation plus élevés, où la rupture en compression est atteinte, permettra de se rapprocher de cette limite. La valeur de  $\tau$  peut être interprétée comme une mesure de l'importance du gradient de déformation, indiquant à quel point et à quelle vitesse ce dernier affecte le matériau. Cela ouvre de nouvelles perspectives pour explorer cette limite de déformation en compression. En examinant les limites de déformation qu'une fibre de carbone unique peut supporter en compression, certains travaux [8], [9] ont réalisé des tests de compression sur une fibre de carbone unique. Dans le premier travail [9], réalisé sur des fibres de carbone T300 ayant des propriétés similaires à celles des fibres AS4, ils ont obtenu une déformation ultime de rupture de  $150000\mu\epsilon$  pour une fibre unique en compression. Cette valeur dépasse largement les valeurs les plus élevées que nous avons obtenues ( $33500\mu\epsilon$ ).

#### 4. Conclusions.

En conclusion, un dispositif de flambement à articulation par broches a été développé, inspiré des travaux de Wisnom [7], pour évaluer l'effet du gradient de déformation sur la rupture en compression. Comparé aux travaux expérimentaux précédents, des techniques plus modernes, comme la corrélation d'images numériques (DIC) 3D, ont été utilisées pour obtenir les champs de déplacement et de déformation. De plus, pour surmonter la rupture du côté en traction, causée par l'effet élevé du gradient de déformation sur notre matériau, une méthode innovante a été employée en ajoutant une couche d'aluminium sur la face en traction, afin d'éviter sa rupture. Les résultats montrent que l'AS4/8552 présente un fort effet de gradient de déformation, avec les éprouvettes plus fines atteignant une rupture en compression jusqu'à  $33240\mu\epsilon$ . La loi du gradient de déformation pour ce matériau n'est pas linéaire, contrairement aux résultats des expériences précédentes [7]

#### Références

- [1] L. Greszczuk, « Compressive Strength and Failure Modes of Unidirectional Composites », in *Analysis of the Test Methods for High Modulus Fibers and Composites*, ASTM International 1100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 1973, p. 192- 217. doi: 10.1520/STP36486S.
- [2] W. t'Hart, « Compressive strength of various CFRP's tested by different laboratories », *NLR Tech. Publ. TP 93155 LGarteur TP-063*, 1993.
- [3] C. Soutis, J. Lee, et C. Kong, « Size effect on compressive strength of T300/924C carbon fibre-epoxy laminates », *Plast. Rubber Compos.*, vol. 31, n° 8, p. 364- 370, oct. 2002, doi: 10.1179/146580102225006459.
- [4] J. Lee et C. Soutis, « Thickness effect on the compressive strength of T800/924C carbon fibre-epoxy laminates », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 36, n° 2, p. 213- 227, févr. 2005, doi: 10.1016/S1359-835X(04)00158-7.
- [5] F. Laurin, P. Paulmier, et F.-X. Irisarri, « Determination of the longitudinal compressive strength of a CFRP ply through a tensile test on a laminate », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 113, p. 209- 219, oct. 2018, doi: 10.1016/j.compositesa.2018.07.026.
- [6] N. Carbajal et F. Mujika, « Determination of compressive strength of unidirectional composites by three-point bending tests », *Polym. Test.*, vol. 28, n° 2, p. 150- 156, avr. 2009, doi: 10.1016/j.polymertesting.2008.11.003.
- [7] M. Wisnom, « On the high compressive strains achieved in bending tests on unidirectional carbon-fibre/epoxy », *Compos. Sci. Technol.*, vol. 43, n° 3, p. 229- 235, 1992, doi: 10.1016/0266-3538(92)90093-I.
- [8] M. Ueda et M. Akiyama, « Compression test of a single carbon fiber in a scanning electron microscope and its evaluation via finite element analysis », *Adv. Compos. Mater.*, vol. 28, n° 1, p. 57- 71, janv. 2019, doi: 10.1080/09243046.2018.1433506.
- [9] M. Ueda, W. Saito, R. Imahori, D. Kanazawa, et T.-K. Jeong, « Longitudinal direct compression test of a single carbon fiber in a scanning electron microscope », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 67, p. 96- 101, déc. 2014, doi: 10.1016/j.compositesa.2014.08.021.

