

# Caractérisation de la résistance en compression de structures composites Carbone-Epoxy haute performance dans le nautisme de compétition

PY. MECHIN<sup>a</sup>, V. KERYVIN<sup>b</sup>, D. GLEHEN<sup>c</sup>, A. LAUNAY<sup>d</sup>

a. Univ. Bretagne-Sud, EA 4250, LIMATB, F-56321 Lorient, France ; GSea Design, F-56270 Ploemeur, pierreyves@gseadesign.com

b. Univ. Bretagne-Sud, EA 4250, LIMATB, F-56321 Lorient, France ,  
vincent.keryvin@univ-ubs.fr

c. GSea Design, F-56270 Ploemeur, contact@gseadesign.com

d. Univ. Bretagne-Sud, EA 4250, LIMATB, F-56321 Lorient, France ; GSea Design, F-56270 Ploemeur

## Résumé :

*Les matériaux composites Carbone/Epoxy à fibres hautes performances sont des matériaux de premier choix pour la conception/fabrication de structures utilisées dans des conditions extrêmes. Ils présentent toutefois des résistances moindres en compression, d'autant plus importantes que le module d'élasticité des fibres est élevé. La prédiction analytique de leur rupture en compression est délicate, de par les mécanismes engagés. La caractérisation expérimentale n'est également pas aisée, les tests de compression axiale conduisant généralement à une rupture de la structure par flambement et non par rupture du matériau. Cette dernière constatation soulève la question de savoir si la résistance en compression d'un matériau composite est une propriété du matériau ou une propriété de la structure étudiée. Cette problématique est discutée ici par la réalisation d'une étude comparative entre un modèle et une campagne expérimentale en flexion 4pts réalisée sur différentes structures et configurations matériaux.*

## Abstract :

*High performance Carbone/Epoxy materials can be considered as tailored materials to design and build structures subjected to extreme conditions. However, compressive strengths have been reported to be lower than tension ones. This is all the truer that the elastic modulus of fibres increases. The analytical prediction of failure is quite difficult due to the numerous mechanisms at stake. Experimental testing is also not convenient. Axial compression tests usually lead to buckling of structure and not to a compressive failure. Those observations raise the following issue: is failure of composite a material or structure property? This is addressed in this study by means of experimental (4Pts bending test) and numerical comparisons using several structures and materials configurations.*

**Mots clefs : Compression, flexion, essai de structure, fibres hauts modules**

# 1 Introduction

En raison de leur grande résistance et rigidité spécifiques, les matériaux composites renforcés de fibres de carbone haut module sont largement utilisés dans les structures hautes performances tels que les voiliers de compétition pour la Coupe de l'America, le Vendée Globe, la Volvo Ocean Race ... Au cours des 20 dernières années, des cabinets d'ingénierie comme HDS (Brest) ou Gsea Design (Lorient) ont contribué à la conception de structures telles que le maxi-trimaran Banque Populaire V (Détenteur du record autour du monde en un peu plus de 45j), Banque Populaire VII (Vainqueur de la

dernière route du Rhum, cf. figure 1) ou encore Macif (vainqueur du dernier Vendée Globe 2011-2012).



Fig. 1. Banque populaire VII, construit en 2006 (Crédits Photo T. Martinez/BPCE)

L'une des spécificités de ces matériaux est leur moindre résistance à la compression vis-à-vis de la traction. GSea Design, société d'ingénierie spécialisée dans le calcul et le dimensionnement des voiliers de compétition, et le LIMATB, laboratoire de recherche de l'Université de Bretagne-Sud, se sont associés pour approfondir leurs connaissances sur la tenue en service de ces structures, en particulier en compression.

La spécificité de la rupture en compression a été mise en évidence au cours des 50 dernières années sur les plis unidirectionnels (UD) dans le sens de la compression. Rosen[1] fût le premier à proposer une approche liée au comportement de la matrice. Un pas significatif fût franchi par Budiansky & Fleck[2] qui ont avancé l'idée que la rupture en compression est obtenue par la combinaison d'un flambement des fibres et d'un cisaillement viscoplastique de la matrice.

Plus récemment, les travaux de Grandidier [3][4] indiquent que cette rupture est de plus dépendante de l'architecture de l'empilement (angles des plis hors plan et la quantité de plis dans la direction principale) et également du type de sollicitation.

Dans la continuité, Berbinau [5] suggère de calculer la contrainte de cisaillement hors-plan en fonction d'un chargement extérieur (l'accroissement significative de la contrainte hors plan étant le marqueur de la rupture). Les travaux de Pinho[6] sont basés sur une approche équivalente. Ces derniers critères proposent des modèles à l'échelle macroscopique (empilement), approche différente des critères quadratiques multi-axiaux comme Tsai-Hill ou Tsai-Wu qui suggèrent une approche pli par pli négligeant ainsi tout effet de structure.

Des caractérisations expérimentales ont été réalisées par le passé, notamment dans le cadre de travaux collaboratifs entre le laboratoire Ifremer de Brest et des écuries de course au large ou bureau d'étude tels que HDS [7].

Grandidier et Casari ont réalisé dans le cadre de la validation expérimentale des essais de flexion 3points sur des fibres ultra haut modules [3]. Des essais de flexion rotulée ont également été entrepris par Grandidier et al.[8]. Cependant, pour l'étude de chargements de compression pure, peu d'études ont pu être identifiées pour des fibres haut module.

## 2 Matériaux et procédures expérimentales

Sur le plan expérimental, la mise en évidence de la rupture en compression est donc complexe. Les normes usuelles (D695, D3410) suggèrent de réaliser un test de compression uni-axiale. La pertinence des résultats obtenus est cependant à relativiser (difficulté expérimentale due au flambement global, grande disparité des résultats) : des résistances très basses sont souvent observées (de l'ordre de 60% des valeurs en traction). Une seconde approche consiste à effectuer cette caractérisation dans un essai de flexion 4 points (proposé notamment dans la norme D6272 ou C393).

Afin de se familiariser avec ces méthodes de caractérisation, et d'étudier l'effet de structure suggéré par Grandier[3], différents essais ont été réalisés en flexion 4 points (monolithique, sandwich et structure complète).

Ces essais sont réalisés sur des fibres de type HS40, dites fibres haut module. Ces fibres sont utilisées pour les plis à 0° (UD). Des fibres de moindre module HR40 sont utilisées pour les plis hors-axes ( $\pm 45^\circ$ ). Les drapages réalisés pour les échantillons sont différents pour les essais monolithiques et essais sandwich. Toutefois, le motif d'étude pour la compression est maintenu :  $\{\pm 45^\circ/0^\circ_X/\pm 45^\circ\}$  avec X le nombre de plis à 0° consécutifs.

Des essais de flexion 4 points sur des échantillons monolithiques sont réalisés pour caractériser la rupture des plis à 0°. Les essais sont réalisés en accord avec la norme ASTM D6272. Les résultats sont discutés en comparaison avec ceux obtenus sur les essais sandwichs.

Des essais sur matériaux sandwich sont réalisés pour caractériser des plis à 0° dans un empilement sollicité purement en compression tout en s'affranchissant de la problématique de flambement. Ces essais sont réalisés en lien avec la norme ASTM C393, spécifique aux matériaux sandwichs.

L'architecture des échantillons est adaptée pour répondre à l'objectif d'une rupture en compression, notamment en renforçant les zones sandwich pour pouvoir reprendre le cisaillement hors-plan sans entraîner une rupture au sein de l'âme.

Afin de valider la configuration de l'essai (visualisé sur la figure 2), un modèle numérique est établi pour optimiser puis recouper les résultats réalisés expérimentalement. Cela a permis notamment

de valider la compression réelle vue par les fibres à 0° durant l'essai. Ces modèles sont réalisés sous Abaqus 6.13.

Les calculs sont effectués en non-linéaire avec gestion du contact et analyse de post-flambage des plis à 0°.



Fig. 2. Vue du montage de l'essai de flexion 4 points sur échantillons sandwich

Les deux structures présentées précédemment sont des structures ouvertes avec bords libres dans lesquelles on peut envisager que ces bords libres vont influencer sur les résultats. Un essai a donc été effectué sur un tube fermé d'une longueur de 4m avec un empilement proche des cas d'études précédents.

Cet essai d'envergure a été réalisé selon le montage schématisé sur la figure 3. Les résultats obtenus ont permis de valider le principe d'un essai de flexion 4pts sur structure mais n'ont pas permis de conclure sur la résistance à rupture compte tenu de la présence de défauts géométriques initiaux qui ont généré des concentrations de contrainte.

Afin de suivre l'essai, des jauges de déformation ainsi que des capteurs d'émission acoustique ont été introduits.

Cet essai sera discuté lors de l'exposé.

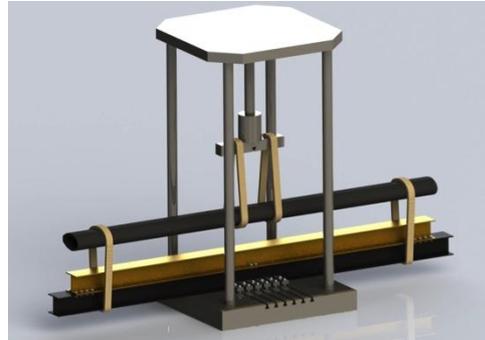


Fig. 3. Schéma du montage de l'essai de flexion 4 points sur un tube fermé

### 3 Dépouillement et analyses

Le dépouillement des résultats obtenus expérimentalement est réalisé en utilisant la relation de la théorie des poutres en flexion 4 points (cinématique d'Euler-Bernoulli) pour connaître déformation et contrainte normales dans les UD les plus chargés, ainsi qu'en dépouillant les résultats obtenus par les jauges de déformations bi-axiales, quand les échantillons en étaient équipés.

Il se dégage des résultats équivalents entre les échantillons monolithiques et échantillons sandwich, ce qui corrobore le modèle proposé par Grandidier. L'ensemble des dépouillements sera discuté en détails lors de l'exposé.

### 4 Conclusion et perspectives

L'objectif premier de ces essais était la mise en œuvre expérimentale d'une caractérisation de fibres haut module en compression et de juger de la congruence avec le modèle de Grandidier. Ceci est réalisé par un essai de flexion 4 points. Ce travail a été réalisé conjointement avec l'établissement d'un modèle éléments finis sous Abaqus.

L'obtention de résultats souhaités sur des essais sandwich est une base intéressante pour la suite des travaux expérimentaux qui consisteront en une étude de la fatigue de ces mêmes matériaux composites sous chargement en fatigue.

A noter également que la possibilité d'une caractérisation de la rupture des plis à 0° dans un échantillon sandwich est économiquement intéressante avec un coût matière moindre que celui requis par les essais sur des échantillons monolithiques.

### 5 Remerciements

Les auteurs remercient l'UFR SSI de l'UBS, le plateau Compositicde leur accueil pour ces différents essais ainsi que F. Portanguen de l'atelier SSI pour la conception des essais. Remerciements également aux étudiants de Master Pro Génie Mécanique et Matériaux qui ont participé aux essais et à la conception des modèles. Nous remercions également J.-C. Grandidier (ENSMA Poitiers) pour de nombreuses discussions scientifiques autour de ce travail.

## Références

- [1] B. Rosen, "Mechanics of Composites strengthening," Cleveland, Ohio, 1965.
- [2] B. Budiansky and N. Fleck, "Compressive failure of fibre composites," *J. Mech. Phys. solids*, vol. 41, no. No 1, pp. 183–211, 1993.
- [3] J.-C. Grandidier, P. Casari, and C. Jochum, "A fibre direction compressive failure criterion for long fibre laminates at ply scale, including stacking sequence and laminate thickness effects," *Compos. Struct.*, vol. 94, no. 12, pp. 3799–3806, Dec. 2012.
- [4] J.-C. Grandidier and P. Casari, "Critère de rupture en compression dans le sens des fibres du pli unidirectionnel intégrant l'effet de structure," in *JNC 16*, 2009.
- [5] P. Berbinau, C. Soutis, P. Goutas, and P. T. Curtis, "Effect of off-axis ply orientation on 0° fibre microbuckling," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 30, pp. 1197–1207, 1999.
- [6] S. Pimenta, R. Gutkin, S. T. Pinho, and P. Robinson, "A micromechanical model for kink-band formation: Part II—Analytical modelling," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 69, no. 7–8, pp. 956–964, Jun. 2009.
- [7] P. Casari, D. Choqueuse, P. Davies, and H. Devaux, "Applications marines des matériaux et structures composites," vol. 2, 1965.
- [8] J.-C. Grandidier, "Résistance en compression des composites à fibres longues - HDR," Université de Metz, 1998.