

Caractérisation de la résistance résiduelle après fatigue, en compression, de structures composites Carbone-Epoxy dans le nautisme de compétition

A. LAUNAY^{a,b}, V. KERYVIN^a, J.C. GRANDIDIER^c, P.Y. MECHIN^d,
R. BALZE^b

a. Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient, France ;
vincent.keryvin@univ-ubs.fr

b. GSea Design, 19 rue Jules Guesde 56100, Lorient ; adrien@gseadesign.com

c. ENSMA – Univ. Poitiers, UPR CNRS 3346, Pprime, 86961 Futuroscope Cedex, France

d. Dassault-Systèmes, CATIA Composites, 10 rue Marcel Dassault, 78946 Vélizy-
Villacoublay

Résumé :

Un voilier de courses au large est majoritairement constitué de structures composites minces et élancées, sollicitées en flexion. La flexion induit qu'une face est sollicitée en traction et une face est sollicitée en compression. Les matériaux composites à fibres de carbone et résine époxy ont une résistance en compression nettement inférieure à leur résistance en traction. De ce fait, un voilier de course au large est généralement dimensionné en compression. Afin de garantir la durabilité de ces structures, le bureau d'étude GSea Design s'intéresse au comportement en fatigue, en compression, de structures composites hautes performances. Ce comportement est très dépendant des matériaux utilisés mais également du procédé de fabrication et des défauts induits par ce procédé de fabrication. L'ensemble de ces facteurs font, qu'aujourd'hui encore, ce sujet reste mal maîtrisé au sein du nautisme de compétition. Cet article présente une partie des travaux de recherche qui ont été menés en commun par GSea Design et l'Université de Bretagne Sud afin d'investiguer sur cette problématique.

Dans un premier temps, la méthode utilisée pour réaliser une campagne expérimentale de fatigue en compression sur des matériaux composites à fibres de carbone haut module avec résine époxy sera décrite. Dans un second temps, les résultats de la campagne seront présentés et discutés.

Abstract :

A racing yacht is mainly manufactured of thin and slim composite structures, subjected to bending stresses. The bending induces one face is stressed in tension and one face is stressed in compression. Carbon fibre and epoxy resin composite materials have a much lower compressive strength than tensile. As a result, racing yacht is generally designed in compression. In order to guarantee the durability of these structures, GSea Design design office is interested in the fatigue and compression behaviour of high-performance composite structures. This behaviour is very dependent on the materials used but also on the manufacturing process and the defects induced by this manufacturing

process. All these factors mean that even today, this subject remains poorly controlled within competitive boating. This article presents some of the research work that has been carried out by GSea Design and the University of South Brittany to investigate this issue.

First, the method used to carry out an experimental compression fatigue campaign on high modulus carbon fibre composite materials with epoxy resin will be described. In a second step, the results of the campaign will be presented and discussed.

Mots clefs :

composite ; sandwich ; CFRP ; compression ; fatigue ; résistance résiduelle ; essais mécaniques ; flexion 4 points

1 Introduction

Les matériaux composites, dont l'utilisation s'est démocratisée dans le secteur des transports, sont omniprésents dans le secteur du nautisme de compétition. Ces matériaux hautes performances font, aujourd'hui encore, l'objet de nombreuses études afin de fiabiliser et optimiser leur dimensionnement. Le bureau d'étude GSea Design s'appuie sur plus de 25 ans d'expérience, notamment dans le nautisme de compétition, pour allier performance et fiabilité des structures composites. C'est avec l'objectif d'améliorer sa boucle de dimensionnement que la société a réalisé, en collaboration avec l'Institut de Recherche Dupuy de Lôme et le plateau technique Compositic de Lorient, une étude sur la fatigue en compression des matériaux composites hautes performances.

Pendant longtemps il a été admis, dans le milieu du nautisme, que ces matériaux n'étaient pas sensibles aux phénomènes de fatigue. Pourtant, l'expérience semble avoir montré des ruptures en service, où l'hypothèse d'une cause liée à la fatigue a resurgi. Il est alors nécessaire d'investiguer sur la capacité de ces matériaux à résister à la propagation d'endommagement au sein de la structure.

Un trimaran est constitué de structures minces et élancées généralement soumises à des chargements de flexion. Ceci implique qu'une partie de la section de la structure est soumise à un chargement de compression et l'autre partie à un chargement de traction. Les matériaux composites constitués de fibres de carbone et de résine époxy ont la spécificité d'avoir une résistance en traction nettement plus importante que la résistance en compression. De ce fait, le dimensionnement de ce type de structure peut, dans certain cas, se réduire à un dimensionnement en compression. L'étude de fatigue, faisant l'objet de cet article, s'est intéressée à la fatigue sous chargement de compression de pli unidirectionnels composés de fibres de carbone haut module et d'une résine époxy à basse température de transition vitreuse (120°C).

Cet article décrit, dans un premier temps, la conception d'un montage dédié à la réalisation d'une campagne expérimentale de fatigue en compression sur des matériaux composites à fibres de carbone haut module avec résine époxy. Dans un second temps, les résultats de la campagne seront présentés et discutés.

2. Conception d'un montage dédié

Pour soumettre une structure à un effort de compression, différentes méthodes peuvent être utilisées. La bibliographie nous conduit à trois principales méthodes concernant les CFRP :

- Essai de compression uni-axiale (ASTM D695 ; ASTM D3410)
- Essai de flexion 3 points (ASTM D790)
- Essai de flexion 4 points (ASTM D6272 ; ASTM C393 ; ASTM D5467)

Il a été démontré lors d'une étude européenne réalisée dans le cadre du programme GARTEUR [1], une dispersion importante des mesures de résistance lorsque l'essai de compression uni-axiale était utilisé. D'autres études comme celle de [2] ont démontré que l'essai de compression uni-axiale n'était pas approprié pour des matériaux qui ont un fort degré d'anisotropie comme c'est le cas pour le matériau composite carbone/époxy.

Il existe alors des solutions alternatives comme l'essai de flexion trois points ou l'essai de flexion quatre points sur stratifiés monolithiques. Le premier est difficile à exploiter puisque la zone de compression se trouve sous l'appui central. Le champ de contrainte est donc perturbé par les conditions aux limites, le dépouillement de ce type d'essai n'est donc pas trivial. Le second permet quant à lui d'offrir une zone, entre les appuis centraux, où la flexion est pure [3]. Ainsi, dans cette zone, la face de l'éprouvette où s'appliquent les efforts sera en compression pure et la face opposée sera en traction pure. Le champ de déformation est supposé linéaire dans l'épaisseur puisque les déformations sont faibles (de l'ordre de 0,6% à rupture).

C'est pourquoi, dans le cadre de notre étude, l'essai de flexion quatre points a été utilisé.

De plus, afin d'obtenir une zone en compression pure, une éprouvette ayant une structure sandwich a été conçue. En effet, ce type de structure permet d'avoir une peau en compression quasi pure et une peau en traction quasi pure.

La rupture en compression est due à une instabilité locale conduisant à un micro-flambage plastique [4]. Il convient d'apporter une attention particulière au dimensionnement de l'éprouvette afin de garantir une rupture en compression et s'affranchir de tout autre mode de rupture comme par exemple le délaminage, une rupture de l'âme en cisaillement ou une rupture par effet de bord sous les rouleaux permettant l'application des efforts.

L'ensemble des points critiques a pu être vérifié grâce à une modélisation par la méthode des éléments finis de l'essai de flexion quatre points. Le modèle a également permis d'observer l'influence de certains paramètres comme la hauteur d'âme, la composition de l'empilement ou encore le matériau utilisé pour l'âme [5].

L'étude numérique nous a alors permis de converger vers la géométrie d'éprouvette suivante :

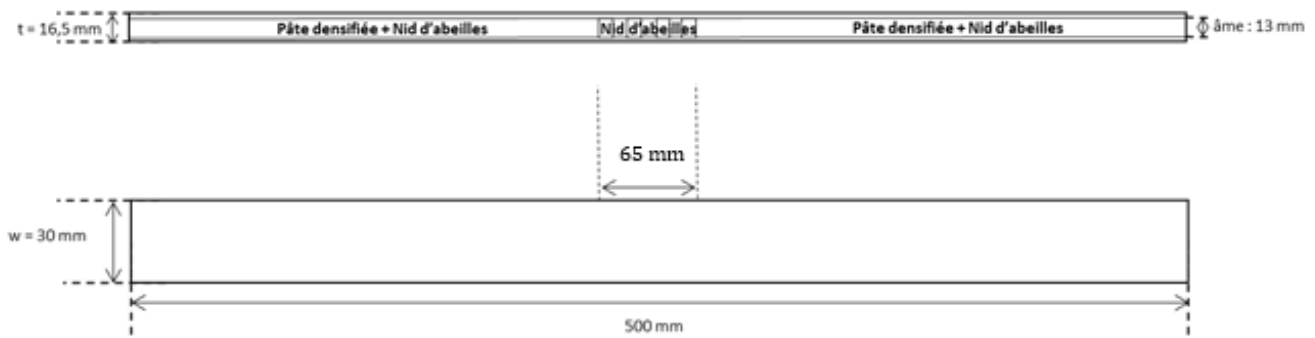


Figure 1 : dimensions de l'éprouvette

Comme le montre la Figure 1, l'éprouvette possède une âme constituée de nid d'abeilles et d'une pâte densifiée introduite à l'état liquide dans les alvéoles du nid d'abeilles puis l'ensemble est cuit afin d'obtenir un volume solide. L'âme de la partie centrale de l'éprouvette, sur une longueur de 65mm, n'est constituée que du nid d'abeilles. En effet, la pâte densifiée permet d'augmenter sensiblement les propriétés mécaniques en cisaillement de l'âme, elle est donc nécessaire, hormis dans la zone centrale dénuée de cisaillement.

Les peaux sont fabriquées à partir de nappes de pré-imprégnées constituées de fibres de carbone haut module HR40 Mitsubishi et d'une résine époxy à basse température de transition vitreuse Structil R367-2 (120°C).

L'empilement de l'éprouvette est le suivant :

$$[+45^\circ / -45^\circ / 0_4^\circ / -45^\circ / +45^\circ / \text{âme} / +45^\circ / -45^\circ / 0_4^\circ / -45^\circ / +45^\circ]$$

Tableau 1 : empilement de l'éprouvette

Les propriétés des matériaux sont les suivantes :

E_L (GPa)	E_T (GPa)	ν_{12} (-)	G_{lt} (GPa)	G_{tt} (GPa)
191	7	0,27	3,4	3

Tableau 2 : propriétés de la nappe unidirectionnelle

Matériau	Module de compression (MPa)	Commentaire
Nid d'abeilles	140	48kg.m ⁻³
Pâte densifiée + Nid d'abeilles	1400	

Tableau 3 : propriétés en compression des matériaux d'âme

Dimensions du montage :

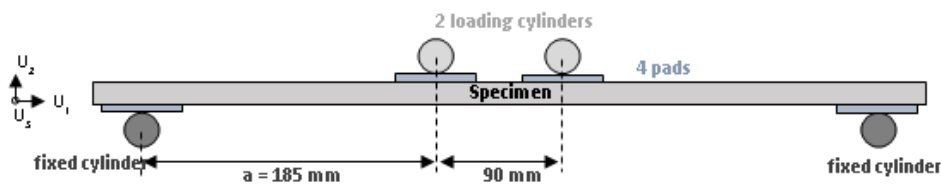


Figure 3 : dimensions du montage

3. Campagne expérimentale

L'objectif étant de mener la campagne de fatigue en résistance résiduelle, une série d'éprouvettes a préalablement été rompue afin de déterminer une résistance initiale moyenne en compression dans le pli unidirectionnel le plus sollicité. Ensuite une autre série d'éprouvettes a été sollicitée en fatigue avec un nombre de cycles variable. Une fois le nombre de cycles atteint, l'essai est alors arrêté puis un essai statique jusqu'à rupture est réalisé afin d'obtenir la résistance résiduelle de l'éprouvette.

Toutes les éprouvettes utilisées lors de notre campagne sont issues d'une seule et même plaque, ce qui garantit un cycle de cuisson identique en étuve.

Une étude préalable a permis de converger vers les paramètres utilisés pour la campagne de fatigue. Ces paramètres sont les suivants :

- Fréquence de sollicitation : 10 Hz
- Rapport de sollicitation R : 1,3
- Contrainte maximale dans l'UD pendant les cycles : environ 85% de la contrainte moyenne à rupture (essais statiques)
- Nombre de cycles : entre 1.10^5 et $9,5.10^6$ cycles

3.1 Résultats des essais statiques

Echantillon	$\sigma_{Rupt.}$ (MPa)
HR40 2-1	936
HR40 2-2	913
HR40 3-1	947
HR40 3-2	763
HR40 4-1	886
HR40 4-2	873
Moyenne	886 ± 61

Tableau 4 : Résultats des contraintes à rupture dans l'UD, lors des essais statiques

Le Tableau 4 présente les résultats des contraintes à rupture de l'UD obtenues pour les six éprouvettes ayant été testées en statique.

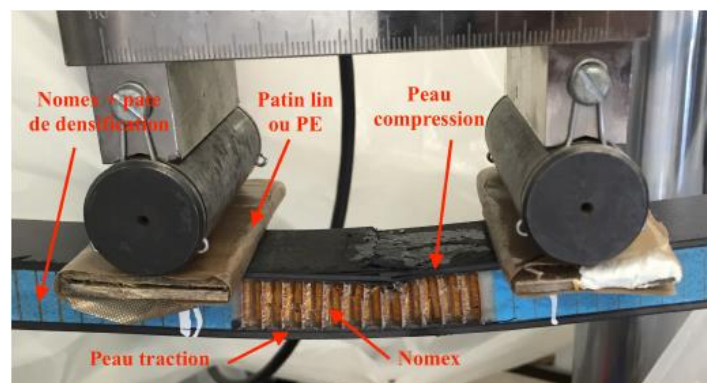


Figure 4 : Vue du faciès de rupture souhaité et obtenu sur une éprouvette dont la rupture est issue d'un essai statique (Source [6])

Pour l'ensemble de cette série, l'observation des faciès de rupture, ainsi que leurs localisations (Figure 4) ont permis de valider la rupture en compression de la peau supérieure de l'éprouvette et donc la conception du montage dédié.

3.2 Résultats des essais de fatigue

Vingt-neuf éprouvettes ont été sollicitées en fatigue dont cinq ont rompu pendant le cyclage. Le Tableau 5 et la Figure 5 présentent les résultats de la campagne de fatigue en indiquant, par éprouvette, le nombre de cycles réalisés ainsi que la contrainte à rupture obtenue après avoir réalisé ces cycles (contrainte résiduelle). Le Tableau 6 indique, quant à lui, le nombre de cycles réalisés au moment de la rupture pour les cinq éprouvettes ayant rompu pendant le cyclage.

Résultats des essais de fatigue :

Echantillon	Nombre de cycles	$\sigma_{Rupt.}$ (MPa)
HR40 14-2	10^5	853
HR40 15-1	10^5	893
HR40 15-2	10^5	979
HR40 16-1	10^5	918
HR40 16-2	10^5	935
HR40 17-2	2.10^5	968
HR40 18-2	2.10^5	946
HR40 30-1	2.10^5	923
HR40 30-2	2.10^5	919
HR40 31-1	3.10^5	916
HR40 31-2	3.10^5	921
HR40 32-1	5.10^5	985
HR40 32-2	5.10^5	974
HR40 29-1	7.10^5	882
HR40 29-2	7.10^5	922
HR40 28-1	7.10^5	963
HR40 35-1	9.10^5	924
HR40 28-2	1.10^6	893
HR40 33-1	1.10^6	959
HR40 33-2	$1,5.10^6$	946
HR40 34-1	$1,5.10^6$	1016
HR40 34-2	$1,5.10^6$	1046
HR40 10-1	2.10^6	926
HR40 11-2	2.10^6	919
HR40 36-1	$9,5.10^6$	1003
Moyenne		941 ± 44

Tableau 5 : Résultats obtenus en fatigue à 10 Hz (avec $\sigma_{moyen UD} = 670$ MPa et $\sigma_{amp. UD} = 80$ MPa) en résistance résiduelle sur les échantillons HR40/R367-2

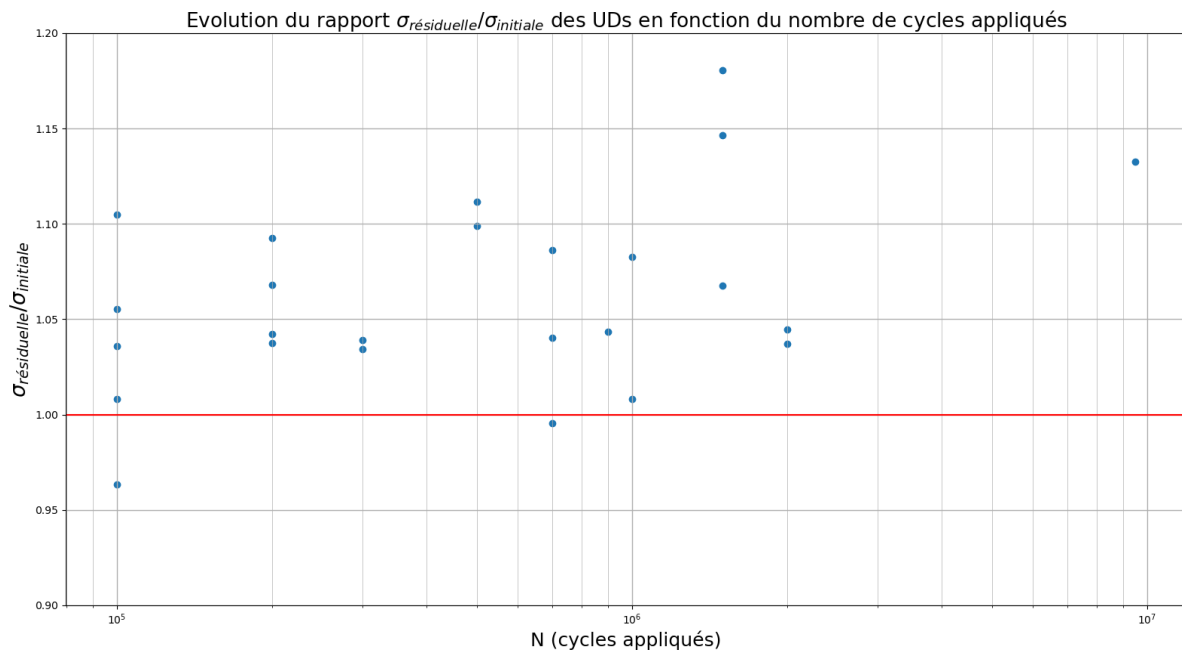


Figure 5 : Evolution du rapport résistance résiduelle/résistance initiale moyenne des UD en fonction du nombre de cycles appliqués

Echantillon	Nombre de cycles réalisés au moment de la rupture
HR40 13-1	$1,3 \cdot 10^6$
HR40 13-2	$3,4 \cdot 10^5$
HR40 14-1	$5,4 \cdot 10^5$
HR40 17-1	$3,0 \cdot 10^4$
HR40 18-1	$4,8 \cdot 10^3$

Tableau 6 : Echantillons ayant rompu pendant le cyclage

Les éprouvettes présentées dans le Tableau 6 semblent indiquer qu'un phénomène de fatigue a eu lieu puisqu'elles ont subi une perte de résistance ayant engendré leur rupture, après avoir réalisé un certain nombre de cycles. Aucun macro-défaut n'a été observé sur ces échantillons.

Les résultats de la campagne nous ont permis de constater qu'avec les paramètres choisis et explicités au paragraphe précédent, aucune dégradation des propriétés mécaniques n'est observable, que ce soit en résistance ou en raideur. Cependant, quelques éprouvettes ont rompu en cours de cyclage, ce qui laisse supposer qu'un endommagement s'est produit dans certains cas. On peut faire l'hypothèse de la présence de défauts initiaux non visible macroscopiquement et très localisés au sein de ces éprouvettes qui, conjuguée au niveau de chargement important, a conduit à un endommagement du matériau.

4. Synthèse

Une campagne de fatigue en compression a été menée pour observer les propriétés résiduelles après cyclage. Pour cela, un montage spécifique a été conçu pour générer une sollicitation de compression quasi pure. Des essais de résistance statique ont d'abord été menés, validant la pertinence du montage. Puis, une campagne de fatigue à 85% de la contrainte moyenne à rupture préalablement déterminée (chargement maximal vu pendant le cyclage), a été menée. La fréquence de sollicitation a été de 10 Hz et le nombre de cycles appliqués a été compris entre 1.10^5 et $9,5.10^6$ pour un rapport de sollicitation de 1,3. Aucune dégradation de résistance et de raideur en compression n'a pu être observée dans le cadre de cette étude. Il semblerait même qu'une légèrement augmentation de résistance en compression soit observée après avoir réalisé plus d'un million de cycles. Cette tendance reste à confirmer et fait actuellement l'objet d'études complémentaires.

Références

- [1] W.J.G. 't Hart, R. Aoki, H. Bookholt, P.T. Curtis, I. Kröber, N. Marks, Garteur compression behaviour of advanced CFRP, AGARD Rep. 785. Util. Adv. Comp. Mil. Aircraft. 73rd Meet. AGARD Struct. Mater. panel held San Diego; 7th-11th October, 1991
- [2] T. A. Bogetti, J.W. Gillespie, Jr & R. Byron Pipes, Evaluation of the IITRI compression test method for stiffness and strength determination, Composites Science and Technology 32, 1988, pp. 57-76
- [3] P-Y Mechin, V Keryvin, J-C Grandidier, and D Glehen. An Analytical Approach to Estimate the Compressive Strength of Carbon Fibre Reinforced Plastics. In 4th Int. Conf. Innov. High Perform. Sail. Yachts, pages 183–191, Lorient, France, 2017.
- [4] P.Y. Méchin, V. Keryvin, J.C. Grandidier, D. Glehen, Incidence du comportement plastique de la matrice époxy sur la résistance en compression des plis à 0° de composites à fibres de carbone, JNC 20, 2017
- [5] A. Launay, P-Y. Méchin, J.C. Grandidier, V. Keryvin, Design and validation of a compression fatigue test on UD's with high modulus carbon fibre and epoxy resin for racing yacht, Composites Part B: Engineering, article submitted
- [6] P.Y. Méchin, Contribution à l'étude de la résistance à la compression des stratifiés composites à fibres de carbone haut module – cas de chargement statiques et cycliques, Thèse de doctorat en mécanique des matériaux, sous la direction de V. Keryvin, Lorient, Université de Bretagne Sud, 2017, 333 p.