

Impact du vieillissement hygrothermique sur le comportement en fatigue des matériaux composites pultrudés à forte fraction volumique de fibres

Impact of hygrothermal ageing on the fatigue behaviour of pultruded composites materials with high fibre volume fraction

Hussein Chebbo^{1, 2}, Romain Léger¹, Arnaud Regazzi¹, Didier Perrin², Patrick Ienny¹

¹ LMGC, IMT Mines Ales, Univ Montpellier, CNRS, Ales, France
hussein.chebbo@mines-ales.fr, romain.leger@mines-ales.fr, arnaud.regazzi@mines-ales.fr et patrick.ienny@mines-ales.fr
² Polymers Composites and Hybrids (PCH), IMT Mines Ales, Ales, France
didier.perrin@mines-ales.fr

Résumé

Aujourd'hui, le secteur des transports traverse de profondes transformations, principalement guidées par l'impératif de réduire l'empreinte carbone. Dans ce contexte, le projet INFRALight a pour objectif de concevoir une infrastructure ferroviaire en composite pultrudé conduisant ainsi à la réduction de l'empreinte carbone. Pour remplir cet objectif, deux matériaux sont envisagés. Le premier est composé d'une matrice de polyamide 6 (PA6) et de fibres de verre et le second est composé d'une résine méthacrylate (Elium C195E) et de fibres de verre. Plusieurs études ont démontré que le polymère Elium est plus durable que le PA6 dont la sensibilité à l'humidité conduit à une chute de ses propriétés mécaniques. Dans cette étude, un vieillissement hygrothermique accéléré à 50 °C et 80 %hr a été réalisé afin d'étudier son effet sur le comportement en fatigue des matériaux pultrudés. Les premiers résultats de fatigue réalisés sur les composites pultrudés non vieillis ont montré que les composites à haute fraction volumique de fibres présentent une durée de vie en fatigue significativement courte.

Abstract

Today, the transport sector is undergoing significant transformations, primarily driven by the need to reduce the carbon footprint. In this context, the INFRALight project aims to design a pultruded composite railway infrastructure, contributing to the reduction of the carbon footprint. The materials considered for this objective are two primary materials: the first is made of polyamide 6 (PA6) and glass fibres, and the second consists of methacrylate resin (Elium C195E) and glass fibres. Several studies have shown that Elium polymer is more durable than PA6 polymers, which are sensitive to moisture, leading to a decline in their mechanical properties. In this study, accelerated hygrothermal ageing at 50 °C and 80 %rh was applied to investigate its effect on the fatigue behaviour of pultruded materials. The initial fatigue results obtained on non-aged, pultruded composites showed that composites with a high fibre volume fraction exhibit significantly shorter fatigue lifetime.

Mots clés : Pultrusion, vieillissement, fatigue

Keywords : Pultrusion, ageing, fatigue

1. Introduction

Les matériaux composites à matrice polymère sont largement utilisés dans les domaines industriels tels que l'aérospatial, l'automobile et la production de l'énergie éolienne en raison de leurs propriétés exceptionnelles. Les matériaux composites pultrudés permettent par exemple d'offrir des propriétés mécaniques élevées dans le sens longitudinal grâce à des taux volumiques de fibres élevés pouvant atteindre 70 %.

Les infrastructures ferroviaires étant soumises à des charges cycliques, des nombreux travaux ont été réalisés dans ce domaine pour des composites obtenus selon diverses méthodes de fabrication. Cependant la fraction volumique de fibres (Vf) des matériaux étudiés dans de

nombreux cas, reste inférieure à 60 %, en raison des contraintes liées au processus de compaction qui limitent la teneur maximale en fibres. Dans leur étude, Sørensen & Goutianos [1], ont montré que la limite d'endurance exprimée en termes de contrainte diminue lorsque la fraction volumique de fibres dépasse le 60%. Cependant la littérature montre que l'étude de l'effet du vieillissement hygrothermique sur les matériaux composites pultrudés reste un sujet encore peu étudié.

Cet article a pour objectif de montrer l'effet du vieillissement hygrothermique sur le comportement en fatigue des matériaux PA6/Verre et Elium/Verre pultrudés.

2. Matériaux et méthodes d'essais

2.1 Matériaux d'études

Les matériaux utilisés dans cette étude sont des composites PA6/Verre et Elium/Verre unidirectionnel (100 % UD) fabriqués par pultrusion. Le profilé PA6/Verre est réalisé avec deux rovings, l'un de 2400 tex (filaments de 17 μm) et l'autre de 4800 tex (filaments de 24 μm). Le roving de 2400 tex est présent dans les couches extérieures, tandis que le roving de 4800 tex compose le noyau. Le profilé Elium/Verre est constitué d'un seul type de roving de 4800 tex. Pour les 2 profilés, une fraction volumique de fibres de 68 % est obtenue. Les profilés pultrudés ont été découpés par jet d'eau pour former des échantillons (250 mm \times 25 mm \times 2 mm³) orientés dans la direction des fibres. Tous les échantillons découpés ont ensuite été conditionnés à 22 °C et 50 % d'humidité relative (HR) pour garantir un même état initial.

2.2 Sorption

Les vieillissements hygrothermiques ont été réalisés en plaçant les échantillons dans des chambres climatiques à 50 °C et 80 %hr. La quantité d'eau absorbée a été mesurée périodiquement en pesant les échantillons à l'aide d'une balance avec une précision de 0,1 mg (Sartorius Secura225D-1S), conformément aux spécifications de la norme ASTM D5229/D 5229M-92. Les courbes d'absorption ont ensuite été obtenues par la méthode gravimétrique en moyennant le pourcentage d'eau absorbée sur cinq échantillons. La teneur en humidité d'un échantillon à un moment donné $M(t)$, a été déterminée comme suit :

$$M(t) = \frac{m(t)}{m(0)} - 1 \quad (\text{Eq. 1})$$

Où $m(t)$ et $m(0)$ sont respectivement la masse de l'échantillon à un instant t et avant le vieillissement.

2.3 Essais quasi-statiques

Tous les tests de traction ont été réalisés conformément à la norme ISO 527-4 sur une machine de traction MTS Criterion C45.105 équipées d'une cellule de charge de 100 kN, avec une vitesse de chargement de 3 mm/min. Cinq éprouvettes sont testées dans tous les cas. Ces tests ont été instrumentés par une technique de corrélation d'images numériques (DIC) afin d'évaluer le tenseur de déformation dans le plan. Le module d'Young et le coefficient de Poisson ont été calculés par régression linéaire entre 0,05 % et 0,25 % de déformation longitudinale sur cinq échantillons.

2.4 Essais de fatigue

Les essais de fatigue ont été réalisés sur une machine Instron 8503. Il s'agit d'une machine servo-hydraulique à sollicitation uni-axiale équipée d'une cellule de 250 kN et pouvant effectuer des essais cycliques à une fréquence maximale de 30 Hz. Les essais de fatigue en mode traction-traction ont été réalisés selon la norme ISO 13003. Pour chaque matériau, jusqu'à 8 niveaux de contrainte ont été testés sur au moins 5 éprouvettes par niveau. Ces niveaux sont compris entre 20 % et 90 % de la contrainte à rupture du matériau obtenue lors des essais quasi-statiques. Un chargement sinusoïdal de 10 Hz et de rapport de charge $R=0,1$ a été appliqué à chaque échantillon. La fréquence a un impact significatif sur la fatigue des matériaux. À des fréquences élevées, le composite peut s'auto-échauffer, ce qui peut altérer ses propriétés mécaniques, notamment sa résistance à la fatigue. La norme ISO 13003 impose donc une élévation de la température de l'échantillon inférieur à 10 °C lors des essais de fatigue. La fréquence de sollicitation a été sélectionnée de manière à respecter cette exigence. Une mesure de la température a été réalisée grâce à un pyromètre durant le niveau 30 %. Cette technique permet de mesurer la chaleur émise par la surface de l'échantillon en fonction de sa température avec une valeur d'émissivité imposé de 0.9 pour les deux matériaux.

3. Résultats et discussion

3.1 Comportement quasi-statique

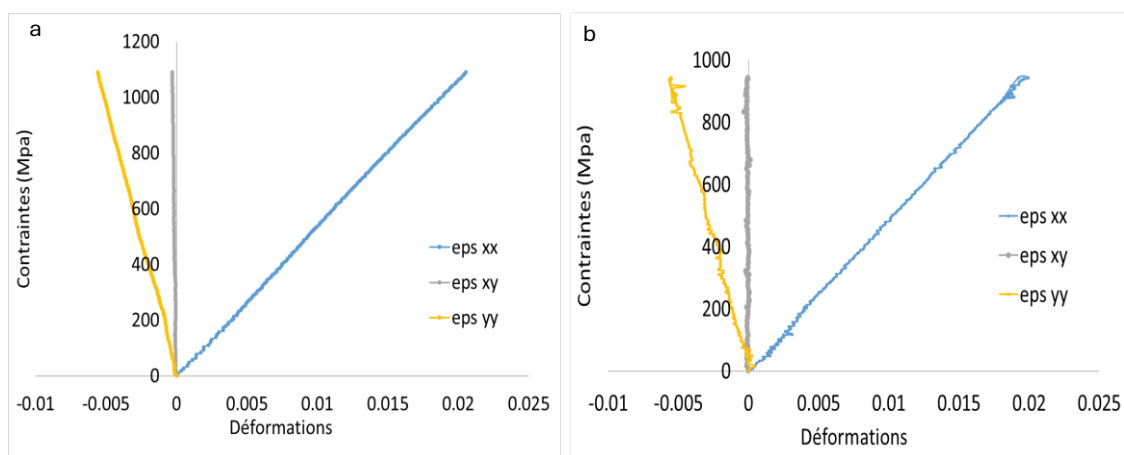


Fig. 1. Comportement quasi-statique en traction sur composites (a) Elium/Verre et (b) PA6/Verre.

La figure 1 montre le comportement d'un échantillon en traction quasi-statique pour les deux matériaux Elium/Verre et PA6/Verre. Les propriétés mécaniques mesurées sont détaillées dans le Tableau 1.

Matériau	E_L [GPa]	ν_{LT} [-]	σ_{Lr} [MPa]
Elium/Verre	54.4 (\pm 2.86)	0.27 (\pm 0.01)	1100 (\pm 31)
PA6/Verre	49.6 (\pm 2.3)	0.30 (\pm 0.02)	881 (\pm 94)

Tab. 1. Propriétés mécaniques (moyennes et écarts-types) issues des essais quasi-statiques sur l'Elium/Verre et le PA6/Verre

Les niveaux de contraintes appliqués lors des essais de fatigue sont calculés à partir des contraintes maximales obtenues lors de ces essais.

3.2 Comportement en fatigue

3.2.1 Courbes d'endurance

La mesure de la température pendant l'essai à un taux de 30 % montre que la température de l'Elium/Verre augmente de 3,1 °C, tandis que celle du PA6 n'augmente que de 1,5 °C. Ces observations montrent que l'échauffement des éprouvettes lors des essais reste inférieur à 10 °C pour les deux matériaux conformément aux exigences de la norme ; d'où une fréquence d'essai choisie de manière à limiter l'échauffement en évitant d'augmenter la durée des essais.

Les tests cycliques, effectués à différents taux de chargement jusqu'à rupture, permettent de tracer le diagramme contrainte-nombre de cycles à la rupture, et ainsi d'élaborer une courbe d'endurance. Afin de comparer entre le PA6/Verre et l'Elium/Verre, les courbes d'endurance sont présentés sous la forme du rapport $\sigma_{max}/\sigma_{rupt}$ en fonction de nombre de cycle N_f).

Les courbes d'endurance obtenue pour le PA6/Verre et l'Elium/Verre montrent un faible comportement à la fatigue similaire aux travaux de Alajarmeh et al. [2] qui ont mis en évidence que les composites pultrudés vinyle ester, avec un taux volumique de fibres de verre de 65 %, sont particulièrement sensibles à la fatigue. Ce phénomène est attribué à une concentration de contraintes élevée au niveau des interfaces fibre-matrice, favorisant l'initiation et la propagation de défauts, et conduisant ainsi à une réduction significative de la durée de vie en fatigue de ces matériaux.

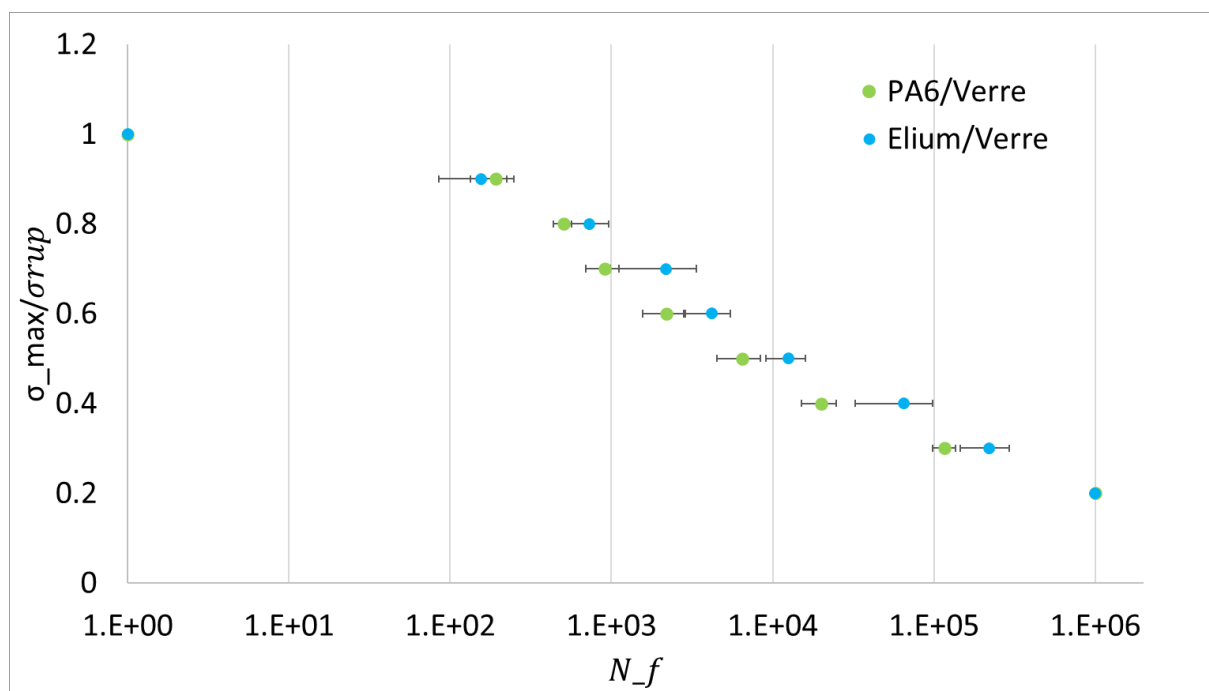


Fig. 2. Courbes d'endurances de l'Elium/Verre et du PA6/Verre

3.2.3 Endommagement des matériaux

En suivant les boucles d'hystérésis au cours des cycles de charge-décharge de deux matériaux, on remarque que l'aire de celles-ci s'accroît, qu'elles se déplacent vers des déformations plus élevées au fur et à mesure des cycles et qu'elles s'inclinent de plus en plus. L'apparition d'une déformation résiduelle s'explique par l'accumulation de déformation plastique, alors que l'inclinaison des hystérésis est due à une baisse de rigidité qui augmente avec la répétition des cycles. En comparant les comportements des deux matériaux, on constate que l'Elium/Verre

présente une déformation résiduelle plus marquée que le PA6/Verre conduisant alors une plastification plus importante. Cependant le PA6/Verre subit une diminution significative de sa rigidité au cours d'essais.

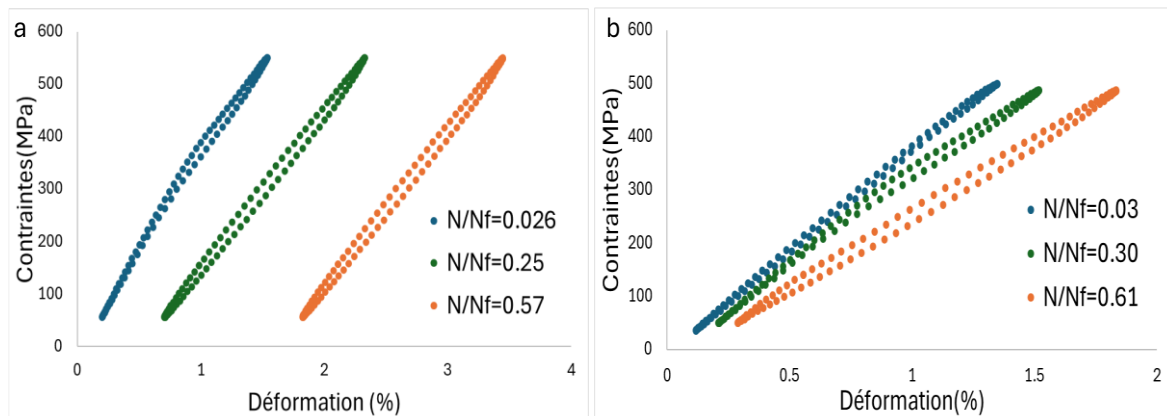


Fig. 3. Déplacement des boucles d'hystérésis en fatigue à un niveau de charge 50 % pour (a) l'Elum/Verre et (b) le PA6/Verre

4. Conclusions et perspectives

Cette étude a permis d'examiner le comportement en fatigue de matériaux composites pultrudés PA6/Verre et Elum/Verre sous des taux de charge variant de 90 % à 20 %. Le suivi des boucles d'hystérésis permet de décrire la phénoménologie du comportement des deux matériaux aux cours d'essais, l'aire produite par ces boucles augmente avec l'avancement des cycles indiquant que les matériaux dissipent plus d'énergie à l'approche de la rupture.

Un vieillissement hygrothermique à 50 °C et 80% HR sera appliqué à ces matériaux afin d'étudier l'impact du vieillissement sur leurs propriétés en fatigue.

Remerciements

Ce projet a été financé par l'Etat dans le cadre du Programme d'investissements d'avenir, désormais intégré à France 2030, opéré par l'ADEME.

Références

- [1] Sørensen, B. F., & Goutianos, S. "Prediction of fatigue limit for unidirectional carbon fibre/epoxy composites", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 388, 2018.
- [2] Alajarmeh, O., Manalo, A., Ferdous, W., Almasabha, G., Tarawneh, A., Awwad, K. E., Safonov, A., Zeng, X., & Schubel, P. "Fatigue behavior of unidirectional fiber-reinforced pultruded composites with high volume fiber fraction", Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. Vol. 46 n°6, pp. 2034-2048, 2023.