

Impact de la fatigue et du vieillissement hygrothermique en eau douce sur un composite unidirectionnel verre-époxy

Younès Menail¹, Bachir Redjel², Abderrahim El Mahi³ & Mustapha Assarar⁴

¹LR3MI, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba.

²Laboratoire de Génie civil, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba.

³Université du Maine, LAUM, CNRS UMR 6613, av. O. Messiaen, 72085 Le Mans cedex 9, France

⁴Université de Reims, Champagne-Ardenne, GRESPI, IUT de Troyes, 9 rue de Québec BP396 10026 Troyes Cedex, France

Révisé le 18/09/2011

Accepté le 03/10/2011

ملخص

يساهم هذا الموضوع في إبراز مدى فعالية كل من الإرهاق عن طريق الجذب والهزم الطبيعي في الماء العذب. هذان الفعلين اللذان طبقا على مركبين من نوع زجاج ابوكسي. ولهذا أنجزنا سلسلتين من التجارب لإظهار فعالية الإرهاق وفعالية الهزم الرطب. خلال السلسلة الأولى احتفظنا بعدد دورات الإرهاق ثابتة وعددها 1000 دورة وغيرنا عدد ساعات غمر المركبين في الماء من 100 إلى 1000 ساعة. أما بالنسبة للسلسلة الثانية تم تغيير عدد دورات الإرهاق من 500 إلى 2000 دورة واحتفظنا بساعات الغمر ثابتة ومدتها 1000 ساعة. بينت النتائج المتحصل عليها أن فعالية الإرهاق مضرة أكثر من فعالية الهزم وأن المركب من نوع زجاج درع النسيج أكثر مقاومة من نوع زجاج أحادي الاتجاه.

الكلمات المفتاحية: زجاج ابوكسي - إرهاق - هزم - الماء العذب.

Résumé

Le présent article contribue à mettre en relief l'impact de la fatigue en traction et du vieillissement naturel en eau douce sur deux composites, verre époxy. Deux séries d'essais ont été mises en place pour distinguer les effets de la fatigue et ceux du vieillissement hygrothermique. Durant la première série, nous avons gardé le nombre de cycles de fatigue constant, fixé à 1000 cycles et nous avons varié les durées d'immersion des matériaux de 100 à 1000 heures. Pour la deuxième série, nous avons varié le nombre de cycles de fatigue de 500 à 2000 cycles et nous avons gardé la durée d'immersion constante, fixée à 1000 heures.

Les résultats obtenus nous ont permis de constater que l'effet de la fatigue est plus néfaste pour les deux matériaux que l'effet du vieillissement. De plus, le composite verre sergé est plus résistant que le composite verre unidirectionnel.

Mots clés : Verre – Epoxy – Fatigue - Vieillissement hygrothermique – eau douce.

Abstract

This article contributes in highlighting the impact of tension fatigue and natural aging in freshwater on two composites, glass epoxy. Two sets of tests were conducted to distinguish the effects of fatigue and hygrothermal aging. During the first serie, the number of cycle of fatigue was set at 1000 cycles and we varied the materials times immersion from 100 to 1000 hours. For the second series, we varied the number of cycles of fatigue from 500 to 2000 cycles and we kept the immersion time constant, set at 1000 hours. The results we have found show that the effect of fatigue is more harmful for both materials than the effect of aging and that the composite glass twill is stronger than the composite glass unidirectional.

Keywords: Glass fibers - Epoxy fibers – Fatigue - Hygrothermal aging - water.

¹Auteur correspondant : menailyounes43@gmail.com

1. INTRODUCTION

L'utilisation progressive des matériaux composites s'est faite sur la fiabilité de ses derniers, qui a fait ses preuves durant ces dernières années. Ces matériaux gagnent du terrain par rapport aux matériaux classiques, grâce à leurs coûts très compétitifs et à leurs caractéristiques propres (résistance à la fatigue, légèreté, résistance à la corrosion, facilité de moulage.... etc). Ils ont investi la plupart des domaines industriels (aérospatial, aéronautique, nautique, ferroviaire, automobile), et l'engouement pour ces matériaux ne fait qu'augmenter d'année en année et de domaine en domaine.

L'objet de cette étude peut être considéré comme étant un additif aux multiples travaux consacrés aux matériaux composites [1, 2]. Elle vise à mettre en relief, les interactions entre la structure du matériau, la fatigue et le processus de vieillissement hygrothermique, afin de prédire la durabilité de ces matériaux.

La particularité de cette étude, se résume au protocole suivi pour déterminer l'impact de certains paramètres, sur deux composites étudiés, à base de fibres de verre et de résine époxyde. Les essais réalisés consistent à engendrer par fatigue des fissurations dans les matériaux avant leur vieillissement naturel. Les matériaux utilisés sont de type marin, de part leurs structures et de part leur mode d'obtention.

Quelle que soit son utilisation, le matériau composite est soumis à une humidité relative. Dans notre cas, il a été exposé à une humidité extrême, puisqu'il a été plongé dans de l'eau douce pendant des durées variables, allant de 100 à 1000 heures.

Il est à noter que les résultats exposés dans cet article, ne sont qu'une partie d'une étude qui tient compte d'autres paramètres et d'autres matériaux [3].

2. MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Les plaques de composites, objet de notre étude, ont été élaborées en France à l'université du Maine au Mans, au sein du laboratoire du CNRS, le LAUM. Les deux matériaux étudiés sont des stratifiés en verre à matrice époxyde. Le premier est de type verre E unidirectionnel croisé [0.90]_S, quant au second, il est de type verre E sergé 2x2.

La technique utilisée pour l'obtention des plaques est le moulage sous vide, en utilisant les tissus adéquats. L'opération de moulage a duré 6 heures pour chaque plaque, sous une dépression de $0.3 \cdot 10^5$ Pa. La polymérisation au four électrique a nécessité 8 heures à une température de 80°C. Le découpage des éprouvettes a été réalisé grâce à une tronçonneuse à disque diamanté aux dimensions suivantes : 200x20x1 mm³.

Les essais ont été réalisés sur une machine hydraulique universelle d'une capacité de 100 kN. Il s'agit en l'occurrence du modèle 8516 de la firme INSTRON. Cette machine est pilotée par ordinateur. La vitesse de traction choisie est de l'ordre de 1 mm/mn. Les paramètres enregistrés, contrainte et déformation sont fixés grâce à un logiciel machine Instron.

Le protocole de fatigue en traction des deux matériaux considérés lors de notre étude est effectué en trois phases consécutives.

Phase une : L'éprouvette est chargée à une vitesse constante de 1mm/mn, jusqu'à la valeur de 50% de la valeur du déplacement à la rupture des essais statiques.

Phase deux : La fatigue est détectée sous forme d'onde sinusoïdale de 10 Hz de fréquence. L'amplitude utilisée est de l'ordre de 10 % de la valeur de déplacement à la rupture.

Phase trois : C'est le déchargement de l'éprouvette après fatigue.

Après cette phase, l'éprouvette peut être sollicitée de nouveau en traction, jusqu'à rupture. Elle est plongée dans l'eau douce, pour une durée déterminée. Les durées d'immersion retenues pour cette étude sont : 100, 500 et 1000 heures. La température de l'eau est fonction du milieu ambiant et elle varie selon les saisons de 15 à 25°C.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Essais statiques

Afin de connaître le comportement en fatigue des deux matériaux, nous avons commencé par des essais statiques. Ces essais nous permettent de déterminer la contrainte maximale de rupture et la déformation correspondante. Ces paramètres, portés sur le tableau 1, servent de base pour les essais de fatigue [4].

Tableau 1. Résultats d'essais statiques.

Caractéristiques mécaniques	Verre sergé	Verre Ud
Masse surfacique (g/m ²)	300	300
Fibre (%)	64%	67%
Module longitudinal (GPa)	14	16.5
Module transversal (GPa)	14	--
Contrainte à la rupture (MPa)	353	424
Déformation à la rupture (%)	3.8	3.9

Les résultats obtenus nous permettent de tracer la figure 1. Les deux matériaux ont un comportement quasi-linéaire, qui se manifeste par l'augmentation de la valeur de la contrainte proportionnellement à l'augmentation de la valeur de la déformation jusqu'à la rupture. Cette rupture est caractérisée par un arrêt net de l'augmentation de la contrainte et une brusque diminution. Elle est de type fragile, elle est due à la rupture des fibres.

A dimensions et poids relativement égaux, l'éprouvette en verre unidirectionnel est plus résistante que celle en verre sergé ; en effet, la valeur de la contrainte à la rupture de la première est supérieure à celle de la seconde.

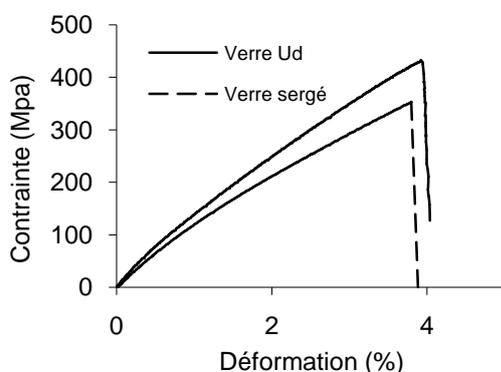


Figure 1. Courbes contraintes déformations

3.2 Fatigue

Afin de distinguer les effets de la fatigue de ceux du vieillissement naturel sur les deux matériaux, nous avons effectué deux séries d'essais.

Pour la première série, nous avons gardé le nombre de cycles constant, de l'ordre de 10000 cycles tout en variant les durées d'immersions (100, 500 et 1000 heures) (Fig. 2 et 3).

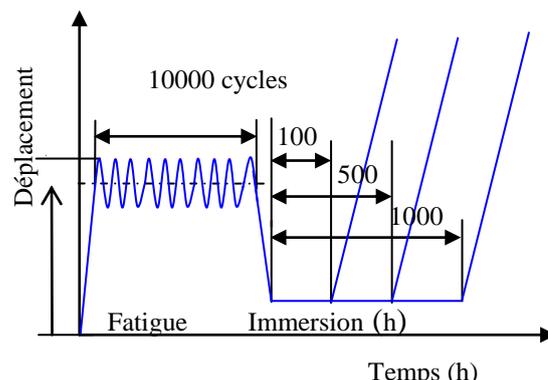


Figure 2. Protocole d'essais avec variation des durées d'immersion

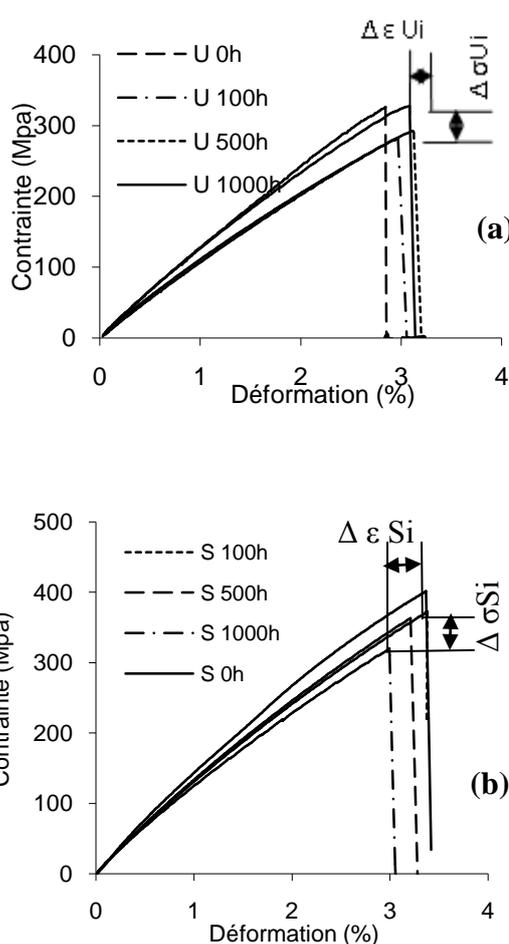


Figure 3. Résultats des essais statiques après fatigue à 10000 cycles de fatigue: a) Verre U, b) Verre sergé

Pour la seconde série, le nombre de cycles de fatigue varie (5000, 10000 et 20000) et la durée d'immersion reste constante ; elle est de l'ordre de 1000 heures (Fig. 5 et 6).

La série d'essais menée à durée de fatigue constante de l'ordre de 10000 cycles, suivis de différentes durées d'immersion pour les différents matériaux, ainsi que ceux menés avec variation du nombre de cycles avec immersion constante de l'ordre de 1000h, a été suivi d'essais statiques monotones, afin d'évaluer le comportement mécanique de ces derniers. Les résultats obtenus sont représentés par les figures 4 à 7.

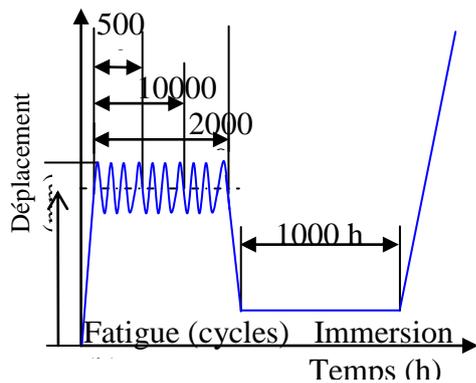


Figure 4. Protocole d'essais avec variation du nombre de cycles

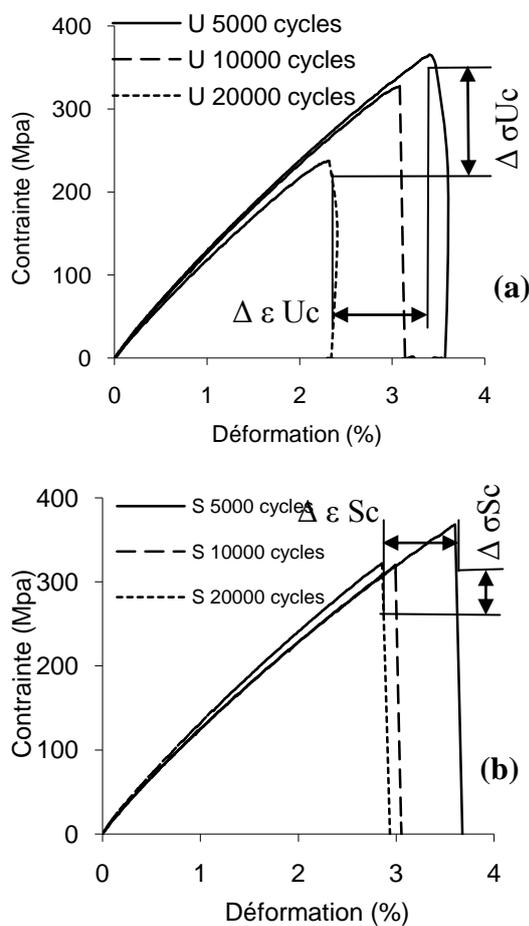


Figure 5. Résultats des essais statiques après fatigue et 1000 h d'immersion : a) Verre U, b) Verre sergé

La dégradation et la rupture des éprouvettes se déroulent en trois stades comme le suggèrent Talreja [5] et Muc [6]. Elle commence par la rupture de la matrice puis vient le délaminage et enfin la rupture des fibres [7].

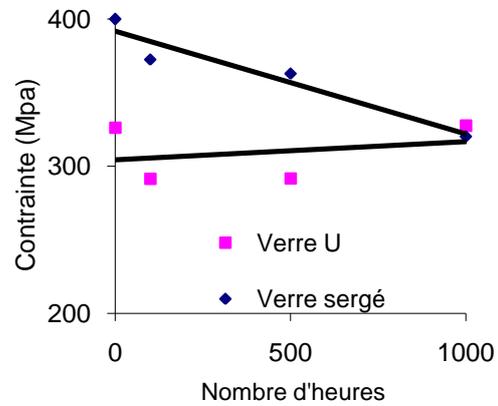


Figure 6. Résistance à la rupture en fonction de la durée d'immersion

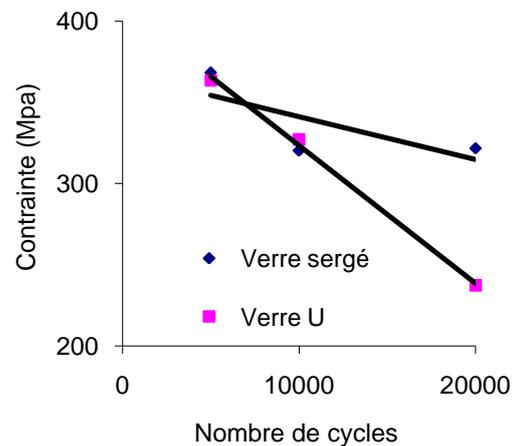


Figure 7. Résistance à la rupture en fonction du nombre de cycles

Pour mettre en évidence les effets de la fatigue et du vieillissement, nous avons procédé à des comparaisons entre les différentes variations de la contrainte et de la déformation des deux matériaux. Ces différences seront notées comme suit :

$\Delta \epsilon_{Uc}$: Variation de la déformation du verre U, en variant le nombre de cycles.

$\Delta \epsilon_{Sc}$: Variation de la déformation du verre Sergé, en variant le nombre de cycles.

$\Delta \sigma_{Ui}$: Variation de la contrainte du verre U, en variant la durée d'immersion.

$\Delta \sigma_{Si}$: Variation de la contrainte du verre Sergé, en variant la durée d'immersion.

L'augmentation du nombre de cycles de fatigue se manifeste par une dégradation progressive du matériau. Plus il augmente, plus

la contrainte et la déformation correspondantes diminuent. Cette dégradation, observée aussi bien pour le verre U que pour le verre sergé, est plus importante au sein du verre U. Le verre sergé est donc plus résistant que le verre U.

$$\Delta \varepsilon_{Uc} > \Delta \varepsilon_{Sc} \text{ et } \Delta \sigma_{Uc} > \Delta \sigma_{Sc}.$$

Après différentes fatigues et différentes immersions dans de l'eau douce, les éprouvettes en verre U et en sergé sont sollicitées en traction jusqu'à la rupture. Les résultats obtenus montrent une dégradation progressive en fonction de la durée d'immersion [8, 9]. Plus cette dernière est importante, plus le matériau devient fragile [10,11].

La dégradation hydrolytique se manifeste par une fissuration osmotique liée à une infiltration d'eau par capillarité dans les fissures de la matrice et par le délaminage interfacial renfort matrice, engendrés par la fatigue, et dans les porosités dues au moulage [12].

Un endommagement par fissuration osmotique lié à une reprise d'eau très importante a été identifié au-delà de 120 heures de vieillissement. Ces résultats confirment donc l'état d'endommagement du matériau [6]. A 20°C, les éprouvettes atteignent rapidement l'équilibre (35 jours), à 0.35% d'absorption et un modèle de Frick permet de décrire correctement la cinétique d'absorption [14].

A une température de 23°C, les interactions entre l'humidité et l'endommagement par fatigue, ne pourront se faire qu'à l'échelle locale, après diffusion capillaire de l'humidité en fond de fissure [15,16].

A ce stade, la dégradation du matériau est irréversible et se répercute sur les propriétés physiques et chimiques de ce dernier. Elle se manifeste ensuite par une diminution progressive des caractéristiques mécaniques du composite et peut atteindre la rupture.

Par contre les éprouvettes en verre U, lors des essais statiques après fatigue et immersion, ne suivent pas le cheminement classique. Plus la durée d'immersion est importante, et plus le matériau est résistant. Ceci peut être dû à un gain de résistance, engendré par l'infiltration de l'eau au sein de la structure. L'immersion en eau douce, malgré le vieillissement, contribue à la relaxation des contraintes internes, créée lors de la fatigue. Ce processus a déjà été relaté par des études précédentes [7, 17 - 19].

4. CONCLUSION

Les résultats de cette étude, consacrés à la mise en évidence des effets de la fatigue en traction et du vieillissement naturel sur deux matériaux composites, verre unidirectionnel et verre sergé à matrice époxyde, ont révélé que ces deux derniers présentent des similitudes dans leurs comportements. Il s'avère que la dégradation engendrée par la fatigue, au sein des deux matériaux est plus importante que celle engendrée par le vieillissement dû à l'immersion dans l'eau douce. Il est à noter aussi que le matériau en verre sergé est plus résistant que le matériau en verre unidirectionnel.

REFERENCES

- [1] Assarar M., 2007. Etude expérimentale et modélisation du comportement dynamique des composites stratifiés et sandwichs. Thèse de Doctorat en mécanique. Université du Maine. France. 158p.
- [2] Marec A., Thomas J-h. & El Guerjouma R., 2008. Damage characterization of polymer based composite materials, multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data, *Mech Syst Signal proc.*, Vol. 22, 185-192.
- [3] Menail Y., El Mahi A., Assarar M. & Redjel B., 2008. The effects of water aging on the mechanical properties of glass-fiber and kevlar-fiber epoxy composite materials, *International Symposium on Composites and Aircraft Materials*, Agadir, Morocco, may, 12-14.
- [4] Mercier J., 2006. Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites. Thèse de Doctorat en sciences et génie des matériaux. Ecole de Mine de Paris. France. 260p.
- [5] Talreja R., 1990. Fatigue of composite materials: Analysis, Testing and Design. Siminar Technomic publishing Co Inc, Lancaster, Basel, Switzerland, 12, 124-132.
- [6] Muc A., 2000. Design of composite structures under cyclic loads. *Computers and Structures*, Vol. 76, 211-218.
- [7] Payan J., 2004. Etude du comportement de composites stratifiés sous chargement statique et de fatigue. Thèse de Doctorat en mécanique. Université Aix Marseille II. France. 139p.

- [8] Perreux D., Suri C., Varchon D. & Oytana C., 1992. Endommagement mécanique de matériaux composites. Rôle sur les propriétés hygrothermiques. La construction navale en composites. Paris, 7-9 décembre 1992. IFREMER.
- [9] Adda-Bedia E.A, Bouazza M., Tounsi A., Benzair A. & Maachou. 2007. Prediction of stiffness degradation in hygrothermal aged [0m/90n]s composite laminates with transverse cracking. *J. Mater. Process. Tech.*, Vol. 58, 1016-1023.
- [10] Bouazza M., Tounsi A., Benzair A. & Adda-Bedia E.A. 2007. Effet of transverse cracking on stiffness reduction of hygrothermal aged cross-ply laminates" *J. Mater. Design*. Vol. 28, 1116-1123.
- [11] Dhakal H.N., Zhang Z.Y. & Richardson M. O. W., 2006. Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. *J. Composite Sci. and Technol.*, Vol.34, 1674-1683.
- [12] Assarar M., Scida D., A. El Mahi A., Poilâne C. & Ayad R., 2010. Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: Flax-fibres and glass-fibres. *J. Mater Design.*, Vol. 24, 106-113.
- [13] Foulc M.P., Bergeret A., Jenny P., Ferry L. & Crespy A., 2002. Caractérisation du vieillissement hygrothermique de matériaux composites PET/fibres de verre par photomécanique, *Matériaux*, Vol. 36, 139-146.
- [14] Dal Maso F., Dewille B., Grojean F., Huvey M., Martin J. & Montabord L., 1996. Vieillissement d'armures de traction en composite pour conduites flexibles. *Annales des composites*, AMAC, Moret sur Loing, France, 2, 27-37.
- [15] Vautier E., Abry J.C., Bailiez T. & Chateauminois A., 1996. Durabilité en fatigue de composites unidirectionnels verre-époxy après vieillissement hygrothermique. *Annales des composites*, AMAC, Moret sur Louing, France, 2, 49-58.
- [16] Benkhedda A., Tounsi A., Adda Bedia E.A., 2007. Effect of temperature and humidity on transit hygrothermal stress during moisture desorption in laminated composites plates. *J. Composite Structures*, Vol. 82, 629-635.
- [17] Plepys A.R., & R.J., Farris R.J., 1990. Evolution of residual stresses in three-dimensionally constrained epoxy resins. *Polymer*, Vol. 31, 1932-1936.
- [18] Tsenoglou J., Pavlidou S. & Constantine D., 2006. Evaluation of interfacial relaxation due to water absorption in fiber-polymer composites, *J. Composite Sci. and Technol.*, Vol. 64, 2855-2864.
- [19] Kominar V., 1996. Thermo-mechanical regulation of residual stresses in polymers and polymer composites, *J. Composite Materials*, Vol. 30 (3), 406-415.