

Mise en place d'un protocole expérimental pour l'étude du couplage entre le vieillissement et le comportement en fatigue d'un composite utilisé dans l'industrie marine

**F. HACHE^a, C. BOIS^a, J.C. WAHL^a, A. RENAUD^b, D. CAOUS^c
J. EL YAGOUBI^a**

a. Institut Ingénierie Mécanique I2M, CNRS Université de Bordeaux
florian.hache@u-bordeaux.fr, christophe.bois@u-bordeaux.fr, jean-christophe.wahl@u-bordeaux.fr, jalal.el-yagoubi@u-bordeaux.fr

b. Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) UMR CNRS
7356 alexis.renaud@univ-lr.fr

c. TENSYL damien.caous@tensyl.com

Résumé :

Les composites utilisés dans l'industrie marine, par exemple pour les pales d'une turbine, sont en permanence au contact de l'eau et subissent donc un vieillissement hygrothermique. Afin de décrire le couplage entre le comportement en fatigue de ces matériaux et les dégradations induites par le vieillissement, il convient de proposer un nouveau protocole expérimental. Pour ce faire, les composites dont les propriétés hydriques ont été déterminées au préalable subissent différents chargements de fatigue à certaines étapes de l'exposition. En comparant les résultats obtenus avec ceux d'éprouvettes témoins sollicitées uniquement avant ou après absorption, les couplages entre les différents phénomènes sont décrits. L'objectif final est d'intégrer l'effet du vieillissement dans un méso-modèle de fatigue.

Abstract :

Composites used in marine industry, for instance in blades of turbines, are constantly in contact with water and suffer from the effect of aging. In order to describe the interactions between the fatigue behavior of such materials and the damages that are induced by the water aging phenomena, the experimental protocol has to be adapted. In this purpose, the absorption properties of the material are determined and different cycles of fatigue are applied at different steps of the water ageing. By comparing the results with those of a sample having the cycles only once, without absorption or at the end of the absorption, the interactions between the different phenomenon are observed and can be include in the fatigue model at the ply scale.

Mots clefs : vieillissement, fatigue, composite

1 Introduction

Alors que la France a pour ambition de réduire drastiquement sa consommation en énergie dite fossile et d'augmenter celle en énergie renouvelable (23% d'ici 2020), l'industrie marine porte un intérêt grandissant pour l'étude et la compréhension de la durabilité des matériaux utilisés pour les hydroliennes. En moyenne utilisées pendant 20 ans, un des enjeux majeurs est d'appréhender leur comportement lorsqu'elles sont soumises à d'importantes sollicitations cycliques, empiriquement caractérisées par des essais de fatigue tout en prenant en compte les effets du vieillissement hygrothermique. Dans le cadre du projet ANR Maîtrise des Effets du Vieillissement sur l'Endommagement en Fatigue (MEVEF), on s'intéresse plus particulièrement aux composites verre/époxy constituant majoritairement les pales d'une turbine. Ces matériaux présentent la particularité d'être immergés dans un environnement qui peut conduire à une évolution des performances du composite à cause de plusieurs mécanismes possibles (corrosion, plastification, hydrolyse, ...) et sollicités mécaniquement (fatigue, fluage, couplage entre les différents phénomènes ...) [1,2]. Il convient donc d'adapter les modèles prédictifs afin de prendre en compte ces différents phénomènes et leurs interactions. Parmi ceux existant dans la littérature, ceux à l'échelle du pli [3-8] développés à partir d'une approche thermodynamique ont montré leur intérêt pour le dimensionnement en bureau d'études.

L'absorption de l'eau par le composite et le processus de vieillissement hydrique induisent à la fois des contraintes d'origine hydrique et un changement de l'état physico-chimique du composite. Il en résulte une modification des propriétés mécaniques du matériau composite [9-12] qui peuvent affecter le comportement en fatigue du matériau. La plupart des études dans la littérature consistent à tester en fatigue jusqu'à rupture des matériaux composites après différentes durées d'absorption [13]. L'effet de l'absorption d'eau et du vieillissement hydrique est alors évalué principalement par la variation du nombre de cycles à rupture. Cependant, ces travaux ne sont pas représentatifs de la réalité dans laquelle les chargements de fatigue sont appliqués en continu au cours de l'absorption.

Réciproquement, des études montrent que l'absorption et le vieillissement peut être affecté par la sollicitation mécanique exercée sur le composite. En effet, l'endommagement du matériau (micro-fissures, fissures transverses, délaminages...) facilitent la diffusion de l'eau dans l'épaisseur [14].

Peu d'études sont consacrées au couplage fort entre comportement mécanique et absorption du composite [15,16]. Il s'agit ici d'étudier l'influence du comportement mécanique sur la cinétique d'absorption d'un composite et réciproquement de décrire la dégradation du composite induite par le vieillissement. Pour cela il convient de développer un protocole expérimental permettant de se rapprocher des conditions d'exposition que subit le matériau composite au cours de son utilisation. L'idée présentée dans cet article est non pas d'appliquer les cycles de fatigue en un seul bloc de chargement à la fin du vieillissement, mais d'appliquer des blocs de chargement de fatigue à différentes étapes au cours du processus d'absorption d'eau. L'effet de cette séquence de sollicitation sur différents paramètres comme la cinétique d'endommagement, le nombre de cycles à rupture et la vitesse d'absorption du matériau sera analysé.

2 Matériau et méthodes expérimentales élémentaires

Le matériau étudié est un composite verre/époxy à renfort NCF (Non Crimp Fabric). Des travaux antérieurs ont permis d'étudier le comportement en fatigue de ce matériau [7]. Différents essais sur différentes stratifications ont été réalisés afin d'identifier un méso-modèle qui unifie les chargements quasi-statique et de fatigue [3-8]. Le modèle prend en compte à la fois les pertes de raideur et de résistance dans la direction des fibres induites par l'endommagement. Il est ainsi capable de prédire la durée de vie et la résistance résiduelle de n'importe quelle stratification sollicitée dans le plan. La figure 2 illustre les résultats obtenus avec cette modélisation.

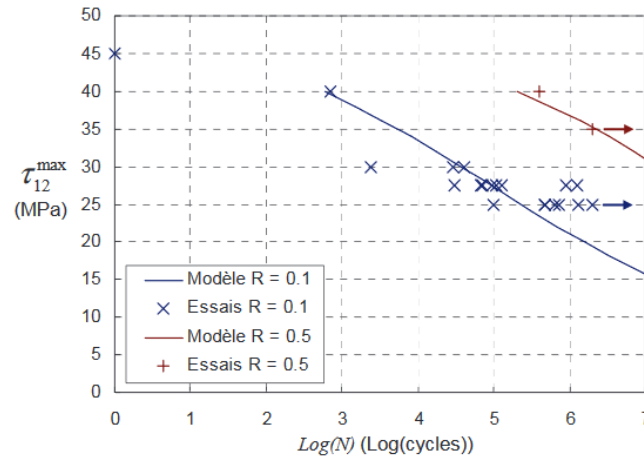


Figure 2. Comparaison modèle-essai : Courbe S-N sous un rapport de charge R=0.1 et R=0.5 à 3 ou 5 Hz d'un stratifié $[\pm 45]_{2s}$ [7]

Pour étudier l'effet de l'absorption d'eau, la stratification choisie est $[\pm 45]_{2s}$. En effet, l'absorption d'eau induit notamment des dégradations physico-chimiques (plastification, hydrolyse, ...) de la matrice polymère. Le comportement en fatigue d'un stratifié $[\pm 45]_{2s}$ étant essentiellement piloté par celui de la matrice, l'effet du vieillissement hydrique est particulièrement visible pour cette stratification.

Afin d'être représentatif du matériau et de son procédé d'obtention, on considère dans cette étude des éprouvettes de dimension $250 \times 25 \times 2.2 \text{ mm}^3$ avec des talons aux extrémités (voir Fig. 1). Les échantillons sont extraits de plaques par découpe à la scie à lame de diamant, conformément aux normes EN6031 et EN6035. La sollicitation de fatigue se fait à un rapport de charge de 0.1.

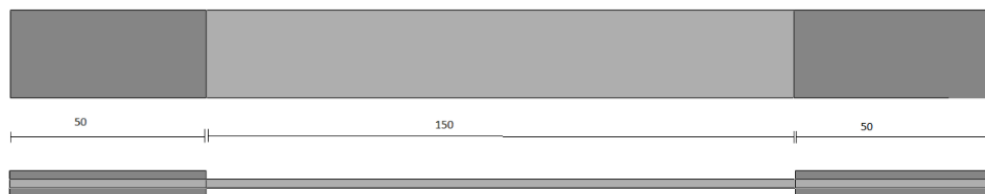


Figure 1. Dimensions (en mm) et géométrie des éprouvettes

Le vieillissement se fait dans un bain d'eau pure thermostaté à 35°C au pH contrôlé à 8.2. Cette température a été choisie afin d'être suffisamment grande pour accélérer le processus de diffusion de l'eau tout en restant en deçà de la température de transition vitreuse de 65°C . La prise en masse est quantifiée par des pesées à intervalles réguliers à l'aide d'une balance de précision. Des mesures préliminaires sur des échantillons, préalablement séchés au dessiccateur, de dimensions $2.5 \times 4 \times 2.2$

mm³ ont permis de caractériser la cinétique d'absorption du composite en immersion continue. Celle-ci, comme le montre la Figure 3 dans laquelle la prise de masse est normalisée par rapport à celle en fin d'absorption, semble suivre une loi de Fick [9,17] dans l'intervalle d'absorption:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

où C est la concentration en eau de l'échantillon, t est le temps, z est l'épaisseur. D est le coefficient de diffusion. Le temps nécessaire à la teneur en eau d'atteindre la valeur à saturation et de s'homogénéiser dans les éprouvettes composites prévues pour les essais mécaniques qui ont une épaisseur de 2.2mm est d'environ 408 jours (voir Figure 3).

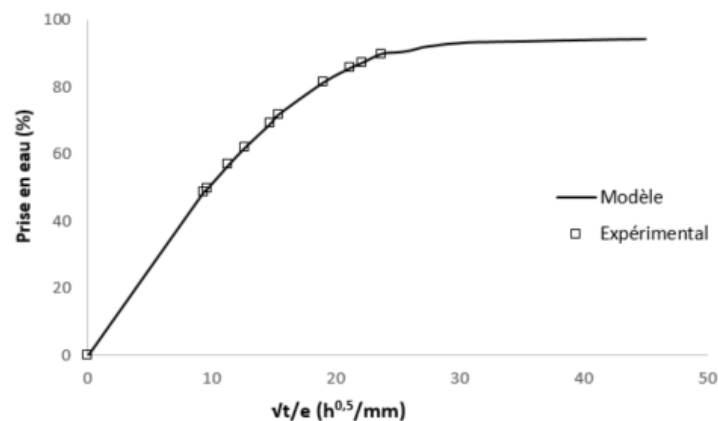


Figure 3. Prise en eau modélisée via la loi de Fick

3 Protocole expérimental pour la caractérisation du couplage fatigue vieillissement

Le but de ce protocole expérimental est de mettre en exergue l'influence du vieillissement sur le comportement en fatigue du composite et réciproquement, d'analyser les conséquences d'un chargement mécanique de fatigue sur la cinétique d'absorption du composite. Les éprouvettes sont soumises à plusieurs blocs de chargement de fatigue au cours du processus d'absorption d'eau. La contrainte longitudinale appliquée à l'éprouvette a été choisie à 40 MPa afin de pouvoir appliquer un grand nombre de cycles à 5Hz sans qu'il y ait de l'auto-échauffement et d'avoir un nombre de cycles proche de ce que subit une hydrolienne. Le nombre de cycles appliqués à chaque étape du séquençement est égal à 1/5 du nombre de cycles à rupture pour une éprouvette saine n'ayant subi aucun vieillissement, celui-ci ayant été déterminé au préalable (voir figure 2). Ceci correspond à des blocs de chargement de 75 000 cycles, soit environ 4h.

Comme résumé dans la table 1, les sollicitations de fatigue sont réalisées à des niveaux d'absorption de 0%, 40%, 60%, 80% et 90% par rapport à la capacité d'absorption totale. Ces valeurs ont été choisies afin de limiter le nombre d'essais mécanique et afin que l'éprouvette puisse absorber suffisamment d'eau entre chaque essai mécanique pour que cela puisse avoir un impact sur le comportement mécanique du matériau. La perte en eau du composite au cours des cycles de fatigue, notamment par évaporation, est limitée en enroulant l'éprouvette dans un tissu que l'on vaporise régulièrement d'eau. Afin de vérifier la validité d'un tel protocole, 50 000 cycles ont été appliqués à

une éprouvette préalablement immergée durant 2 mois. La comparaison de la masse de l'échantillon avant et après essai montre qu'il n'y a pas eu de perte en eau durant la phase de sollicitation mécanique.

Comme indiqué en figure 4, le protocole permet d'isoler une éprouvette afin qu'elle subisse un vieillissement sans cycles de fatigues supplémentaires. Humeau, Davies et Jacquemin [14] ont récemment montré que la cinétique d'absorption, et donc le coefficient de diffusion, dépendait du chargement mécanique auquel est soumis l'éprouvette. Il s'agit de décrire cette influence en donnant une loi de Fick modifiée dans laquelle le comportement en fatigue est pris en compte. Cette loi introduit un coefficient de diffusion D . Il dépend potentiellement de l'état du matériau et notamment de son niveau d'endommagement. Un des enjeux de cette étude est de déterminer ce coefficient pour différentes séquences de fatigue, afin de simuler la distribution dans l'épaisseur de la concentration en eau prenant en compte l'état des sollicitations mécaniques. Entre deux blocs de fatigue appliqué à l'éprouvette, D est constant et l'expression de la masse d'eau gagnée par le composite en fonction du coefficient de diffusion est calculée en supposant un comportement Fickien. Il est alors possible pour chaque intervalle de temps d'absorption au cours duquel l'éprouvette n'est pas sollicitée mécaniquement, de déterminer D par identification avec le modèle. On pourra ainsi montrer que ce dernier augmente avec le nombre de cycles appliqués.

Afin de caractériser l'endommagement induit par le vieillissement, la perte de raideur, définie comme la pente de la courbe force versus déformation pour une charge donnée, est mesurée avant et après chaque bloc de chargement de fatigue à l'aide d'un extensomètre. Cette grandeur permet de définir le niveau d'endommagement tel qu'il est défini dans le modèle de prédiction, sa mesure permettra d'intégrer les effets du vieillissement dans la loi définissant la cinétique d'endommagement à l'échelle du pli. En raison des gradients dans l'épaisseur induits par le processus diffusif d'absorption, l'identification devra s'appuyer sur une modélisation à l'échelle du stratifié combinant diffusion et endommagement.

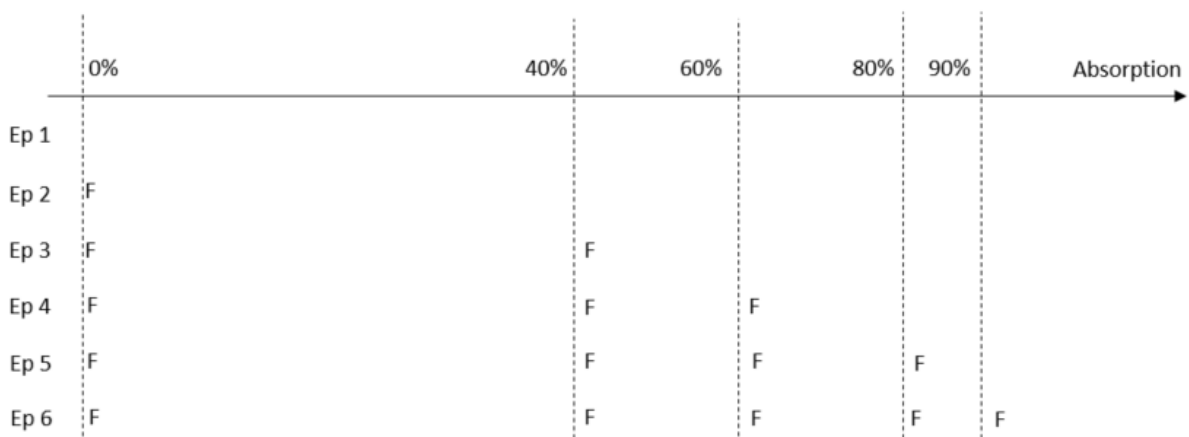


Figure 4. Protocole expérimental avec couplage vieillissement / fatigue, les « F » désignent les chargements de fatigue

3 Conclusion

Un protocole expérimental représentatif de ce que subit le matériau en conditions réelles est proposé. L'objectif est de caractériser l'effet de l'absorption d'eau sur l'endommagement et la durée de vie, mais également l'effet de l'endommagement sur la diffusion de l'eau dans le matériau. Les premiers essais montrent que les phases de sollicitations mécaniques, d'une durée courte par rapport aux durées d'absorption, ne perturbent pas le protocole d'absorption.

Les résultats attendus dans les prochains mois permettront d'identifier des lois phénoménologiques traduisant à la fois l'effet de l'endommagement sur le coefficient de diffusion et l'effet de l'absorption sur l'endommagement. L'identification passera par un dialogue essais calculs à l'échelle du stratifié.

En parallèle de ce travail, les effets visqueux pouvant apparaître pour de grandes durées d'utilisation, ce qui est le cas dans l'industrie marine, sont également analysés afin de dissocier l'effet du cyclage et celui de la charge statique (fluage).

Références

- [1] Y. Hu, X. Li, A.W. Lang, Y. Zhang, S.R. Nutt, Water immersion aging of polydicyclopentadiene resin and glass fiber composites, *Polymer Degradation and Stability* 124 (2016) 35-42
- [2] E. Poodts, G. Minak, A. Zucchelli, Impact of sea-water on the quasi-static and fatigue flexural properties of GFRP, *Composite Structures* 97 (2013) 222-230.
- [3] P. Ladevèze, E. Le Dantec, Damage modelling of the elementary ply for laminated composites, *Compos. Sci. Technol.* 43 (1992) 257-267.
- [4] J. Payan, Etude du comportement de composites stratifiés sous chargement statique et de fatigue, Thèse, Université Aix-Marseille II, 2004.
- [5] C. Hochard, Y. Thollon, A generalized damage model for woven ply laminates under static and fatigue loading conditions, *Int. J. Fatigue* 32 (2010) 158-165.
- [6] D. Caous, C. Bois, J.-C. Wahl, T. Palin-Luc, J. Valette, Toward composite wind turbine blade fatigue life assessment using ply scale damage model, *Procedia engineering* 213 (2018) 173-182.
- [7] D. Caous, Rôle de l'endommagement sur la durée de vie en fatigue des matériaux composites stratifiés: application au domaine éolien, Thèse, Université Bordeaux, 2017.
- [8] D. Caous, J.-C. Wahl, C. Bois, T. Palin-Luc, J. Valette, Apport des modèles d'endommagement à l'échelle du pli pour l'optimisation du dimensionnement des pales d'éoliennes en fatigue, Journées Nationales sur les Composites 2017, Champs sur Marne, France.
- [9] M. Assarar, D. Scida, A. El Mahi, C. Poilâne, R. Ayad, Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: Flax-fibres and glass-fibres, *Materials & Design*, 32 (2011) 788-795
- [10] Chateauminois, A., Vincent, L., Chabert, B., & Soulier, J. P. (1994). Study of the interfacial degradation of a glass-epoxy composite during hygrothermal ageing using water diffusion measurements and dynamic mechanical thermal analysis. *Polymer*, 35(22), 4766-4774.
- [11] N. Tual, Durability of carbon/epoxy composites for tidal turbine blade applications, Thèse, Université de Bretagne Occidentale, 2015.
- [12] M.W. Keller, B.D. Jellison, T. Ellison, Moisture effects on the thermal and creep performance of carbon fiber/epoxy composites for structural pipeline repair. *Composites Part B: Engineering*, 45 (2013) 1173-1180
- [13] A. Malpot, Etude du comportement en fatigue d'un composite à matrice polyamide renforcé d'un tissu de fibres de verre pour application automobile, Thèse, ISAE-ENSMA, 2017
- [14] C. Humeau, P. Davies, F. Jacquemin, An experimental study of water diffusion in carbon/epoxy composites under static tensile stress, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 107 (2018) 94-104.

- [15] Y.J. Weitsman, Fluid effects in polymers and polymeric composites, Springer Science & Business Media; 2011.
- [16] Y. Weitsman, Coupled damage and moisture-transport in fiber-reinforced, polymeric composites, Int J Solids Struct 23 (1987) 1003–1025.
- [17] P.A. Bonniau, A.R. Bunsell, A comparative study of water absorption theories applied to glass epoxy composites, Journal of Composite Materials, 15 (1981) 272-293.