



HAL
open science

Influence du vieillissement hydrique sur les mécanismes d'endommagement et le comportement mécanique des pâles d'éolienne en milieu marin (EMR)

El Hadji Amadou Ba, Khalid Aoujdad, Florian Gehring, Damien Leduc, Pierre Marechal, Mounsif Ech-Cherif El-Kettani, Alexandre Vivet

► To cite this version:

El Hadji Amadou Ba, Khalid Aoujdad, Florian Gehring, Damien Leduc, Pierre Marechal, et al.. Influence du vieillissement hydrique sur les mécanismes d'endommagement et le comportement mécanique des pâles d'éolienne en milieu marin (EMR). Journées Scientifiques et Techniques de l'Association pour les Matériaux Composites (JST de l'AMAC), AMAC, Apr 2024, Toulouse, France. hal-04644429

HAL Id: hal-04644429

<https://normandie-univ.hal.science/hal-04644429v1>

Submitted on 11 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Influence du vieillissement hydrique sur les mécanismes d'endommagement et le comportement mécanique des pâles d'éolienne en milieu marin (EMR)

Influence of water aging on mechanical behavior and damage mechanisms of windturbine blades in marine environment

El Hadji Amadou BA¹, Khalid AOUJDAD², Florian GEHRING¹, Damien LEDUC², Pierre MARECHAL², Mounsi ECH-CHERIF EL-KETTANI² et Alexandre VIVET¹

1: Normandie Univ, ENSICAEN, UNICAEN, CEA, CNRS, CIMAP, 1400 Caen, France
e-mail : elhadji-amadou.ba@etu.unicaen.fr

2 : Normandie Univ, UNILEHAVRE, CNRS, LOMC, 76600 Le Havre, France

Résumé

Le projet COPSHI, supporté par le LABEX EMC3, a pour objectif de démontrer la faisabilité et les performances d'une méthode de contrôle in-situ de l'état de santé matière de structures composites de pâles d'éoliennes marines. Ces pâles subissent des sollicitations couplées mécaniques et environnementales qui génèrent des endommagements et un vieillissement des structures en service. Des structures composites sandwich représentatives de ces pâles ont été soumises à un vieillissement par immersion dans de l'eau de mer à 40°C. L'état de santé matière est défini par un taux d'endommagement interne obtenu en couplant des observations microstructurales, l'abaissement des propriétés mécaniques et un suivi par émission acoustique au cours d'essais mécaniques. Un vieillissement hydrique de 60 semaines a principalement impacté les propriétés des interfaces de la structure sandwich. Ces modifications ont été observées par l'abaissement des propriétés mécaniques de la structure et par l'évolution des signatures acoustiques des classes d'endommagements associées aux interfaces.

Abstract

The COPSHI project supported by LABEX EMC3 aims to demonstrate the feasibility and performances of a method to monitor in-situ the health of composite structures of marine wind turbine blades. These blades undergo coupled mechanical and environmental stresses which generate damages and aging of the structures in operating. Representative-wind-blade composite sandwich structures were subjected to aging by immersion in sea water at 40°. The material health is defined by an internal damage ratio obtained by combining microstructural observations, mechanical properties reduction and acoustic emission monitoring of damage during mechanical loading. A 60 weeks period of water ageing mainly affected the properties of the sandwich structures interfaces. These changes were observed through the reduction of mechanical properties and the modification of the acoustic signatures of the damage groups associated with interfaces.

Mots Clés : Structure sandwich, mécanismes d'endommagement, émission acoustique, flexion, vieillissement hydrique
Keywords: Sandwich structure, damage mechanisms, acoustic emission, bending tests, water aging

1. Méthodologie

1.1 Structure Sandwich

Devant la complexité de la structure interne des pâles d'éoliennes, il a été fait le choix de définir un matériau sandwich représentatif. Les peaux sont des stratifiés unidirectionnels de fibre de verre avec une résine polyester insaturée isophtalique adaptée au milieu marin. Le taux de renfort a été fixé à 35%. La masse volumique des peaux en composite verre/polyester est de 1550 kg.m⁻³. L'âme est une mousse rigide à cellule fermée de polymère SAN (styrène acrylonitrile) adaptée au milieu marin de masse volumique 85 kg.m⁻³. Les sandwiches ont été mis en œuvre par moulage au contact assisté avec une mise sous vide sous une pression de 1 bar. Après le démoulage, les plaques subissent une post-cuisson durant 1 heure à 130°C.

1.2 Essais mécaniques

Un protocole de caractérisation expérimentale du comportement a été mis en place pour reproduire une partie des sollicitations subies par une pale d'éolienne en service. Les structures sandwich sont soumises à des essais de flexion suivant la norme ISO NFT54-606 sur une machine servo-hydraulique équipée d'une cellule d'effort

de 100kN. La base expérimentale est composée de chargement monotone piloté à 2 mm/min et de chargement répété et progressif (CRP). Les dimensions utilisées pour les échantillons sandwich, en accord avec la norme, sont : longueur 220 mm, largeur 27 mm, épaisseur totale 15 mm, épaisseur d'âme 10 mm.

1.3 Emission acoustique

Les essais de flexion sont couplés à l'enregistrement des émissions acoustiques afin de suivre les mécanismes d'endommagement. Pour se faire, deux capteurs piézo-électrique s, de diamètre 20 mm et de bande passante (20 kHz-1 MHz), sont placés au niveau des peaux en tension des éprouvettes sandwich. Ces capteurs transforment les ondes mécaniques issus des endommagements en ondes acoustiques. Les signaux acoustiques sont pré-amplifiés avec un gain de 40 dB avant acquisition sur un PC équipé du logiciel Noesis. La classification des signaux acoustiques a été réalisée par une méthode de K-moyenne permettant de partitionner les données acquises et de les diviser en K groupes. Un nombre d'itérations maximales de 1000 a été utilisé comme critère d'arrêt supplémentaire. On utilise les 5 descripteurs les plus couramment admis dans la littérature, à savoir l'amplitude (dB), le temps de montée (μ s), la durée (μ s), le nombre de coups et l'énergie (aJ) des signaux acoustiques [1,3]. Cette méthode a été appliquée pour classer les signaux en 5 classes associées à 5 mécanismes d'endommagement des structures sandwich, par ordre de sévérité : fissuration matricielle, décohésion fibre/matrice, décohésion âme/peaux, délaminage et rupture des fibres.

2 Résultats expérimentaux

2.1 Vieillessement hydrique

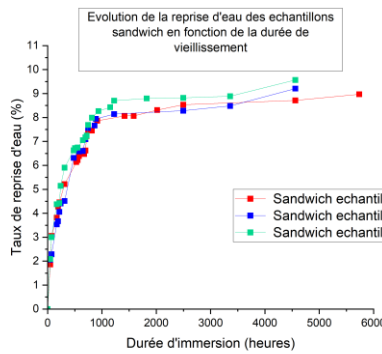


Fig. 1. Courbe de reprise d'eau des échantillons sandwich à 20°C

Après immersion dans de l'eau distillée maintenue à 20°C, un suivi régulier de la masse des échantillons sandwich permet de déterminer que la durée nécessaire pour atteindre la saturation en eau est de 2500 heures (15 semaines) (figure 1). Les éprouvettes sandwich utilisées pour les essais de flexion sont quant à elles immergées entièrement dans de l'eau de mer à 40° C afin de se rapprocher le plus possible des conditions en milieu marin. D'après la littérature, les sels minéraux présents dans l'eau de mer ne modifient pas l'absorption [4]. Néanmoins, les phénomènes de diffusion sont accélérés par la température [4]. La première étape de la caractérisation expérimentale de l'effet du vieillissement des structures immergées dans l'eau de mer intervient donc au bout de 16 semaines.

$$(EI)_{eq} = E_{pe} \frac{b e_a (e_s + e_a)^2}{2} + E_{ax} \frac{b e_a^2}{12}$$

Avec :
 $(EI)_{eq}$: Rigidité en flexion équivalent ($N.m^2$)
 E_{pe} : Module de Young des peaux en fibres verre/polyester (GPa)
 E_{ax} : Module de Young de l'âme en mousse SAN (GPa)
 e_a : épaisseur de l'âme en mousse SAN des échantillons sandwichs (mm)
 e_s : épaisseur des peaux en fibres verre/polyester des échantillons sandwichs (mm)
 b : largeur des échantillons sandwichs (mm)

(1)

$$(AG)_{eq} = 4(e_s + e_a) b G_{axy}$$

Avec :
 $(AG)_{eq}$: Rigidité de cisaillement équivalent (N)
 G_{axy} : Module de cisaillement de l'âme en mousse SAN dans le plan xy (GPa)
 Les valeurs de rigidités de flexion et de cisaillement de l'âme dépend peu du choix du matériau de l'âme, elles sont plus dépendantes de la valeur de l'épaisseur de cette âme.

(2)

$$\tau_a = \frac{P}{2(EI)_{eq}} \left[E_{pe} \frac{e_a (e_s + e_a)}{2} + E_{ax} \frac{e_a^2}{8} \right]$$

Avec :
 τ_a : résistance de Cisaillement de l'âme ou de décohésion peaux/âme (MPa)
 Pour l'âme, le mousse SAN est supposée étant isotrope ce qui le module de cisaillement dans le plan xy, est obtenu à partir du module de Young et du coefficient Poisson dans le plan xy.

(3)

$$E_{dissipee} = E_{deformation} - E_{restituee}$$

Avec :
 $E_{dissipee}$: Énergie surfacique dissipée par la structure ($m.J.m^{-2}$)

(4)

2.2 Caractérisation des sandwichs

Les essais expérimentaux permettent de déterminer plusieurs propriétés et de suivre l'évolution du comportement en fonction du temps de vieillissement :

- les caractéristiques mécaniques : rigidité de flexion équivalente EI_{eq} , rigidité de cisaillement équivalent AG_{eq} et résistance de cisaillement τ_a [2] ;
- les variables internes liées à l'endommagement : endommagement réel $d(t)$, et aux phénomènes de dissipations : énergie surfacique dissipée cumulée par la structure E_{diss} .

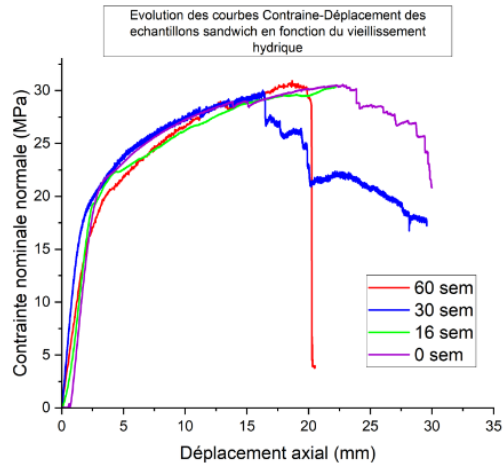


Fig. 2. Evolution des courbes contrainte-déplacement des échantillons sandwich en flexion 4 points monotone en fonction du vieillissement

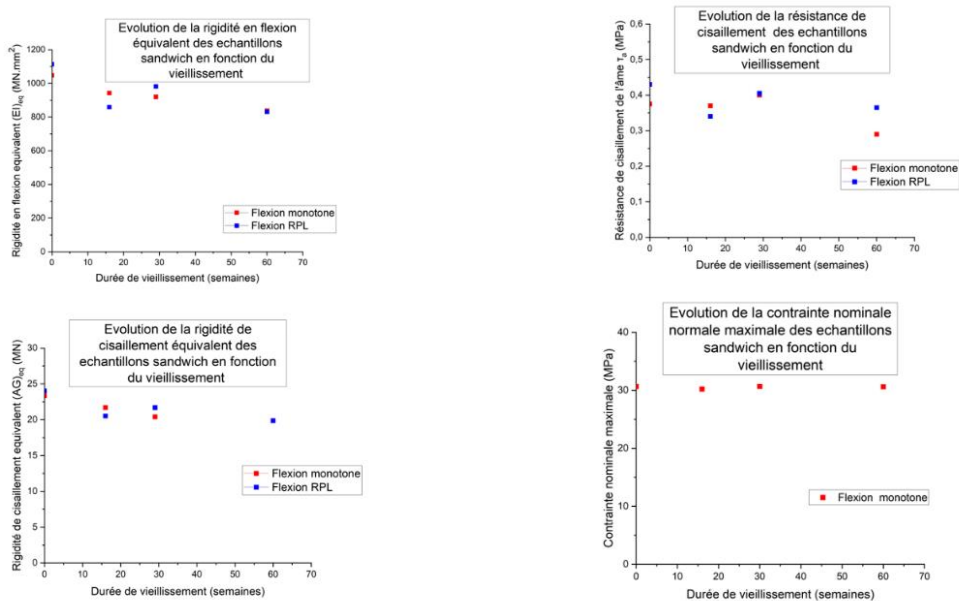


Fig. 3. Evolution des propriétés mécaniques des sandwichs en fonction du vieillissement

La figure 2 illustre l'évolution de la contrainte nominale normale de la peau en tension en fonction de la flèche de l'échantillon sandwich pour différentes étapes de vieillissement. Le comportement global de la structure, en flexion, semble, en première approche, peu impacté par le vieillissement hydrique. L'évolution des propriétés mécaniques ($(EI)_{eq}$, $(AG)_{eq}$, τ_a et σ_{max}) en fonction de la durée d'immersion montre plus finement que le vieillissement hydrique provoque une chute de certaines propriétés (figure 3). En effet, après un vieillissement de 60 semaines, la rigidité en flexion chute entre 20 et 25 % ; la rigidité de cisaillement chute entre 15 et 17 % ; la résistance au cisaillement chute entre 15 et 23 %. La contrainte nominale normale maximale n'est pas impactée par le vieillissement.

2.3 Signaux Acoustiques

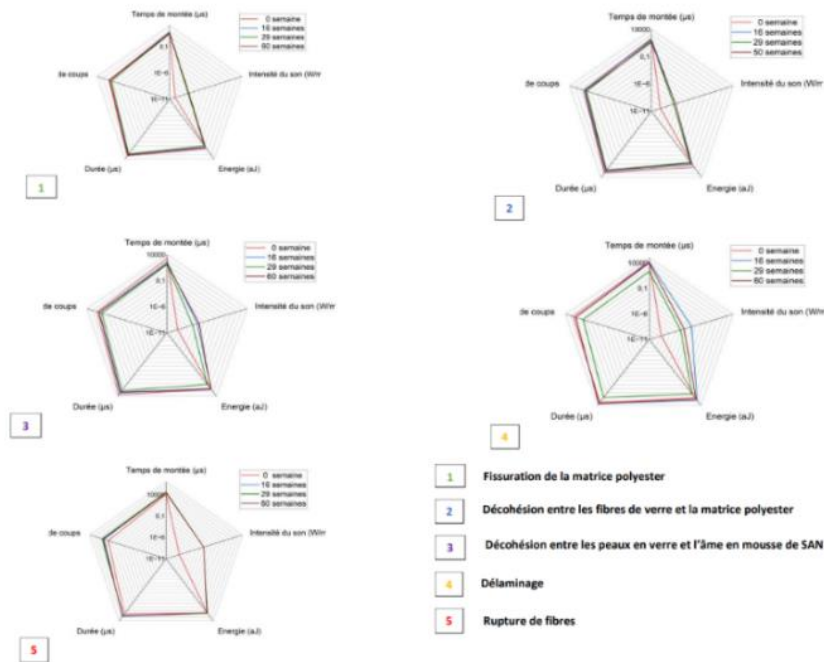


Fig. 4. Evolution des signaux acoustiques en fonction du vieillissement hydrique

La figure 4 montre l'évolution des paramètres moyens des classes des signaux acoustiques associés aux endommagements pour chaque durée de vieillissement. Deux descripteurs semblent être fortement affectés : l'intensité du son et l'énergie. En effet, l'intensité du son augmente brusquement après 16 semaines de vieillissement pour ensuite se stabiliser jusqu'à 60 semaines. Cette évolution est identique pour l'ensemble des classes d'endommagement. A contrario, l'évolution des énergies des signaux dépend des classes d'endommagement. L'énergie moyenne de la classe associée à la fissuration matricielle diminue entre 0 et 16 semaines puis se stabilise pour les vieillissements plus longs. Pour les classes associées aux décohésions, la diminution est lente et progressive entre 0 et 60 semaines. Pour les ruptures de fibres, l'énergie reste constante.

3 Synthèse

Le croisement des informations obtenues montre que les différentes interfaces des structures sandwich sont les plus affectées par le vieillissement hydrique. Ce vieillissement évolue au cours du temps et réduit progressivement la tenue au cisaillement des structures. Au niveau de la tenue en rigidité, ce vieillissement interne ne se manifeste pas de façon significative.

Remerciements

The authors acknowledge the financial support of the French Agence Nationale de la Recherche LabEx EMC3 through the project COSPHI (Grant No. 10-LABX-0009), and the Normandy Region (Réseau d'Intérêt Normand - Label d'excellence)

Références

[1] M. FEHRI « Comportements mécanique et hydrique des composites renforcés par des fibres naturelles et/ou conventionnelles », Ph.D. thesis, Normandie Université, University of Sfax, 2018.
 [2] A. AMRANE « Etude du comportement en flexion d'un panneau à fibres naturelles courtes », Ph.D. thesis, Normandie Université et Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf, 2021.
 [3] A. CHILALI « Etude expérimentale et modélisation de la durabilité des bio-composites à fibres de lin », Ph.D. thesis, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2017.
 [4] A. Le GUEN-GEFFROY « Marine ageing and fatigue of carbon/epoxy composite propeller blades », Ph.D. thesis, Université de Bretagne Occidentale, 2019.