

Vieillessement hydrique des pâles d'éolienne en mer

Water aging of offshore wind turbine blades

El Hadji Amadou BA¹, Khalid AOJJDAD², Florian GEHRING¹, Alexandre VIVET¹,
Mounsif Ech-cherif EL-KETTANI², Damien LEDUC², Pierre MARECHAL²

1 : Normandie Univ, ENSICAEN, UNICAEN, CEA, CNRS, CIMAP, 14000 Caen, France

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

e-mail : elhadji-amadou.ba@etu.unicaen.fr

Résumé

Optimiser le rendement économique et environnemental des éoliennes en mer nécessite de connaître et prévoir la santé matière des pales en service pour prolonger leur durée de vie. Face à un environnement agressif, les matériaux constitutifs d'une structure complexe comme une pale se dégradent et s'endommagent progressivement. On s'intéresse ici au matériau sandwich utilisé dans la fabrication de la voilure. Durant un vieillissement hydrique accéléré par immersion dans de l'eau de mer chauffée à 40°C, l'état santé matière de lots d'éprouvettes est qualifié à intervalles réguliers par des essais mécaniques de flexion 4 points avec un suivi par émission acoustique des endommagements internes. Après 60 semaines de vieillissement, les signatures acoustiques des événements changent et on observe une diminution de la résistance mécanique des interfaces à toutes les échelles du sandwich : fibre/matrice, entre plis stratifiés des peaux, entre peau et âme. La cause principale est à trouver au niveau de la matrice polyester qui se plastifie et s'hydrolyse.

Abstract

To optimize the economic and environmental performance of offshore wind turbines, it is necessary to know and predict the material health of the blades in order to extend their service life. Faced with an aggressive environment, the materials constituting a complex structure such as a blade gradually degrade and become damaged. We are interested here in the sandwich material used in the manufacture of the blade shell. During accelerated water aging by immersion in seawater heated to 40°C, the material health of batches of test specimens is qualified at regular intervals by 4-point mechanical bending tests with monitoring by acoustic emission of internal damage. After 60 weeks of aging, the acoustic signatures of the events change and we observe a decrease in the mechanical resistance of the interfaces at all scales of the sandwich: fiber/matrix, between laminated plies of the skins, between skin and core. The main cause is to be found at the level of the polyester matrix which plasticizes and hydrolyzes.

Mots Clés : éolienne en mer, vieillissement hydrique, endommagement, émission acoustique

Keywords : offshore wind blade, water aging, damage, acoustic emission

1. Introduction

Les éoliennes en mer demandent des investissements lourds. Pour optimiser leur rentabilité financière et environnementale, il est nécessaire de prolonger leur durée de vie au maximum. Ceci passe une connaissance fine de leur vieillissement face à un environnement qui peut s'avérer particulièrement agressif : humidité, salinité, UV, foudre, sollicitations mécaniques complexes (flexion, tension inertielle, torsion), impact par des objets volants (grêlons, oiseaux), impact par la foudre. Une difficulté supplémentaire est la complexité d'une structure de grande ampleur comme une pale, les dernières générations faisant 107 mètres de long.

Le projet COSPHI, collaboratif entre 2 laboratoires normands et soutenu par le LABEX EMC3, a pour ambition d'explorer la capacité du contrôle non destructif par spectroscopie acoustique in-situ pour la mesure de l'état santé matière résiduel des pâles d'éolienne en mer. Pour cela il est nécessaire d'établir un état des lieux des endommagements internes qui peuvent être générés durant la vie en service.

2. Matériaux et protocoles expérimentaux

Devant la diversité des solutions techniques adoptées par les constructeurs d'éolienne en mer, aussi bien en termes de matériaux, de procédés de fabrication que d'architecture des pâles, le projet s'est concentré sur les éléments de voilures constitués de matériau sandwich composite. Les peaux sont constituées de 4 plis d'UD verre, de grammage 500 g/m², avec une résine polyester isophtalique adaptée au milieu marin. Le taux de fibre a été fixé à 40%. L'âme est en mousse polymère Styrène Acrylonitrile SAN, elle aussi adaptée au milieu marin, avec une épaisseur de 10 mm.

Le procédé de fabrication est une imprégnation manuelle avec mise sous vide sous pression de 1 bar. L'adhésion âme/peaux est assurée par la résine polyester d'imprégnation des peaux. Une post-cuisson de 1h00 à 130°C permet d'assurer une réticulation complète de la résine. Le taux de porosité obtenu par une méthode de pesée différentielle est estimé à 8%, consécutif au procédé de fabrication en une seule phase de l'ensemble du sandwich.

Le protocole de vieillissement a été volontairement accéléré pour être tenable dans la durée de l'étude. Plusieurs lots d'éprouvettes sandwich sont immergés dans un bain d'eau de mer à 40°C, dans les bassins du laboratoire LOMC. A intervalles réguliers, un lot est prélevé et soumis à des tests mécaniques de caractérisation de la tenue résiduelle après vieillissement. Le 1^{er} lot est prélevé après 16 semaines de vieillissement. Ce délai de 16 semaines a été validé par une étude préliminaire en laboratoire qui a montré que la reprise d'eau d'échantillons sandwichs immergés dans de l'eau à 20°C était stabilisée après 15 semaines.

Le protocole de caractérisation post-vieillessement des sandwichs est constitué d'essais de flexion 4 points, suivant la norme ISO NFT 54-606, associés à un suivi par émission acoustique des événements internes des éprouvettes durant le chargement mécanique. L'essai de flexion 4 points a été préféré à l'essai de flexion 3 points car il permet d'obtenir un champ de contrainte de tension homogène et constant entre les 2 appuis internes et qui n'est pas perturbé par les effets de poinçonnement et d'endommagement locaux sous l'appui central d'un essai de flexion 3 points. Le pilotage des essais de flexion 4 points se fait soit de façon monotone avec une vitesse de déplacement constante de 2 mm/min, soit sous la forme de cycles successifs de charge/décharge pilotés en force à 0,014 kN/s de telle manière à avoir une vitesse de déformation égale durant la phase élastique de chaque cycle, appelés Chargement Répété Progressif CRP.

Le dispositif d'émission acoustique est composé de 2 capteurs piézo-électriques, de bande passante 40-100 dB, placés sur la peau en tension des sandwichs durant les essais de flexion 4 points, reliés à un logiciel d'acquisition et de traitement des salves acoustiques captées. Chaque salve acoustique est caractérisée par une série de descripteurs tels que durée, amplitude maximale, nombre de coups, énergie, etc. [1-3]. Le logiciel de traitement NOESIS [13] va regrouper les salves acoustiques par cluster dont les descripteurs sont similaires [1, 4-5]. Après classification, chaque cluster est attribué à un mécanisme d'endommagement spécifique avec une signature acoustique représentative. L'évolution des signatures acoustiques en fonction de la durée de vieillissement par immersion apporte des informations sur les modifications internes du matériau sandwich.

3. Tenue mécanique en fonction du vieillissement

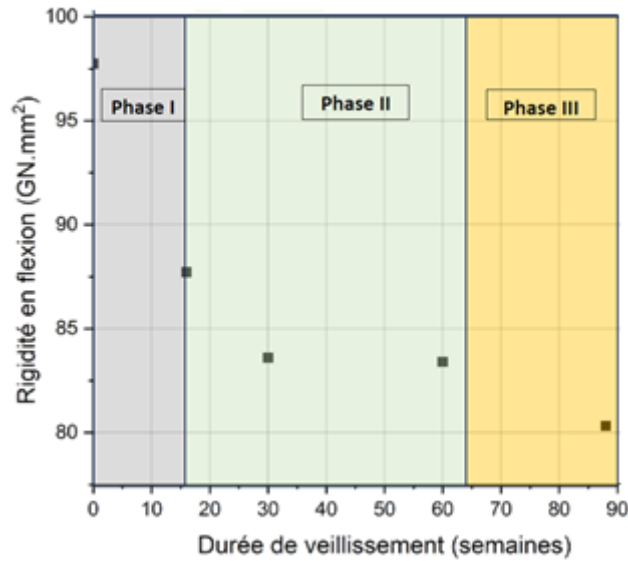


Fig. 1. Evolution de la rigidité initiale du matériau sandwich en fonction de la durée de vieillissement hydrique.

Après la phase I d'absorption d'eau qui génère une baisse significative de la rigidité en flexion des éprouvettes sandwichs, cette rigidité semble se stabiliser durant une 2^{ème} phase II. Au-delà de 60 semaines de vieillissement on observe une nouvelle phase III avec de nouveau une dégradation de la rigidité. Cette accélération de la dégradation des propriétés mécaniques se manifeste à d'autres niveaux. Par exemple, sur la Figure 2 est représentée l'énergie dissipée par le matériau à chaque instant lors d'un essai de flexion 4 points. Le pilotage de l'essai avec un chargement répété progressif CRP permet d'obtenir cette valeur pour différents niveaux de flèche de l'éprouvette, et donc différents niveaux de déformation. En fin d'essai, lorsque l'échantillon est proche de la rupture on observe une augmentation brutale de l'énergie dissipée pour une durée de vieillissement de 88 semaines.

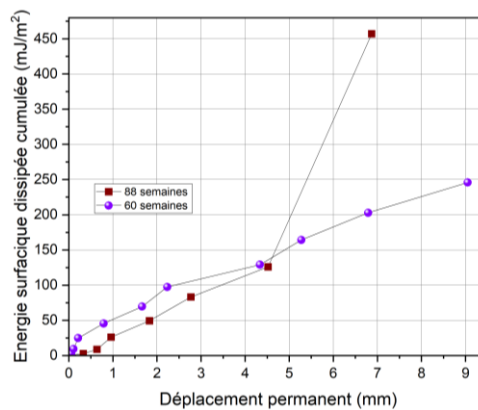


Fig. 2. Evolution de l'énergie dissipée par le matériau sandwich en fonction de la flèche mesurée durant un essai de flexion 4 points en chargement répété progressif, pour 2 durées de vieillissement hydrique.

4. Signatures acoustiques des endommagements

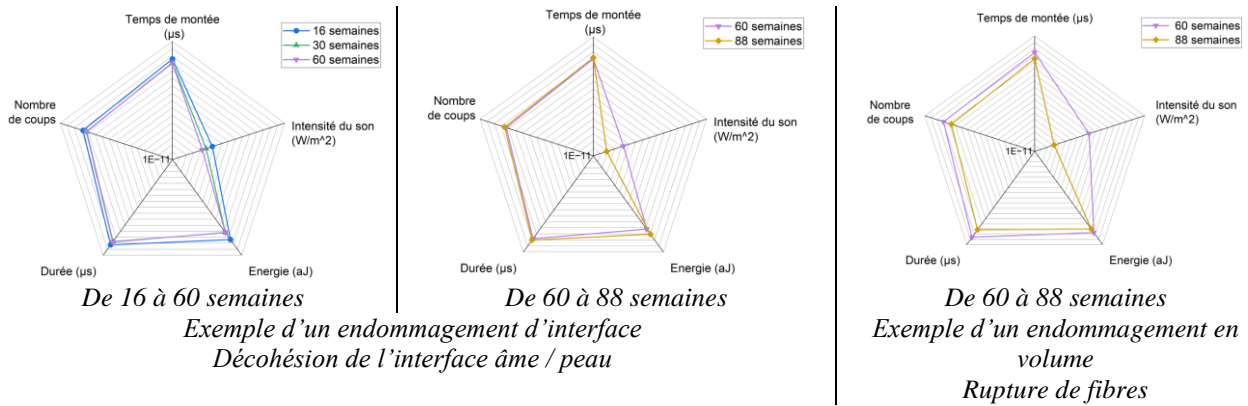


Fig. 3. Exemples de signatures acoustiques d'endommagement en fonction de la durée de vieillissement hydrique.

La procédure de classification des salves acoustiques, en clusters regroupant les salves ayant des descripteurs acoustiques similaires, a conclu à la présence de 5 classes d'endommagement détectés [1-2-3]. On peut les regrouper en 2 sous-groupes, les endommagements en volume : fissuration matricielle et rupture de fibre ; les endommagements d'interface : décohésion fibre/matrice, délaminage entre plis stratifiés des peaux et décohésion âme/peau. Les endommagements critiques amenant à la ruine finale du matériau sandwich sont les ruptures de fibres. Les autres endommagements entraînent une diminution progressive de la rigidité et une augmentation des déformations permanentes.

L'évolution de la signature acoustique de 2 classes d'endommagements est illustrée par la Figure 3 sous la forme de diagramme dit araignée ou radar. Ce type de diagramme permet de visualiser en une seule figure l'ensemble des descripteurs acoustiques mais les problèmes d'échelle de valeur entre les descripteurs ne facilitent pas l'analyse. Il ressort que le descripteur le plus significatif est dans notre étude l'intensité du son. Il faut noter cependant qu'effectuer une classification uniquement à partir de ce seul descripteur ne serait pas pertinent, l'utilisation de plusieurs descripteurs permet une séparation plus fine des clusters.

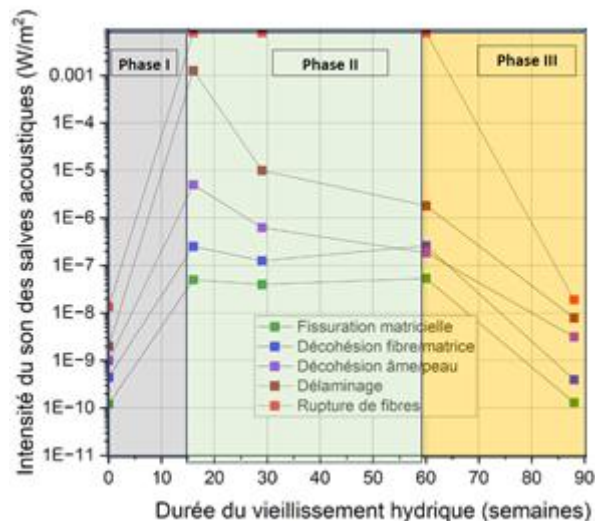


Fig. 4. Evolution de l'intensité du son des signatures acoustiques de chaque classe d'endommagement en fonction de la durée de vieillissement hydrique.

La figure 4 illustre l'évolution du descripteur le plus significatif des salves acoustiques, l'intensité du son. Il ressort clairement une évolution en 3 phases sur la durée d'observation. Durant la 1^{ère} phase, de 0 à 16 semaines, l'intensité sonore augmente de 5 à 7 décades pour toutes les classes

d'endommagement, ceci peut être relié à la phase d'absorption hydrique du matériau. Les porosités des peaux et de l'âme se chargeant en eau, le sandwich est supposé comme étant un meilleur conducteur acoustique. A partir de 16 semaines, le matériau étant arrivé à saturation hydrique, les évolutions de signatures acoustiques peuvent être associées à des évolutions des mécanismes d'endommagements. On peut noter que pour les endommagements d'interface, la dégradation se fait progressivement avec une accélération notable au-delà de 60 semaines. Les signaux acoustiques associés aux endommagements en volume (fibre et matrice) ne sont modifiés que pour les temps longs.

5. Analyse et Conclusions

Le parallèle entre signaux acoustiques et comportement mécanique macroscopique, exposés sur les figures 1, 2 et 4, est assez évident. Le comportement mécanique évolue significativement et cette évolution est liée aux modifications dans les mécanismes internes d'endommagement. Sur les mécanismes d'endommagement détectés, 4 sont liés à la matrice polyester, les fissurations matricielles et les 3 dits interfaciaux : décohésion fibre/matrice, délaminage interlaminaire des peaux et décohésion âme/peau.

Pour explorer les modifications de la matrice une 2^{ème} campagne de vieillissement sur des éprouvettes de peaux stratifiées verre/polyester a été menée sur une durée raccourcie de 22 semaines, par manque de temps par rapport à la clôture du projet COSPHI. La température de transition vitreuse T_G d'échantillons à 3 stades de vieillissement est mesurée par des essais de type DMA, en torsion alternée avec rampe thermique jusque 150°C (Figure 5) [14]. En abscisse on retrouve le nombre de passage dans la machine d'essai Kinetech, ce qui correspond à des cycles thermiques successifs apportant de l'énergie à l'échantillon. La T_G des échantillons non vieillis se stabilise, passant de 106°C à 111°C, après 3 cycles thermiques, ce qui révèle que la polymérisation n'était pas tout à fait complète après la post-cuisson initiale du procédé de fabrication. Après 16 semaines, au 1^{er} cycle thermique, la T_G n'est plus que 95°C, preuve d'une modification notable de la matrice. Après 5 cycles, la matrice a retrouvé son état vierge. Cette modification réversible par absorption d'eau est associée à une plastification du réseau. Par contre, après 22 semaines, d'une part la dégradation de base est encore plus importante ($T_G=78^\circ\text{C}$), mais elle n'est pas entièrement recouverte après plusieurs cycles thermiques. En plus de la plastification réversible, on est en présence de modifications irréversibles de la matrice par hydrolyse du réseau.

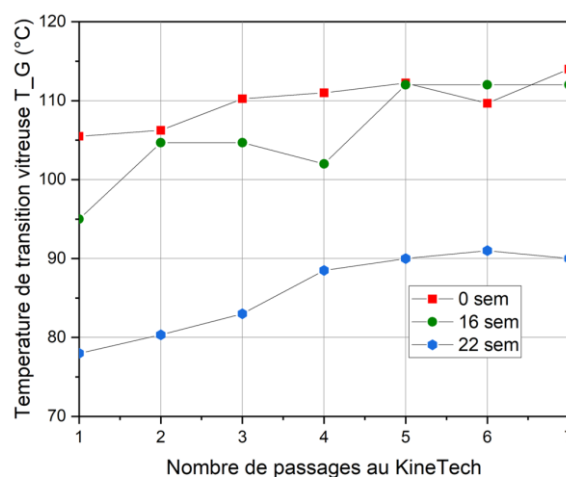


Fig. 5. Evolution de la température de transition vitreuse d'éprouvettes de peaux stratifiées verre/polyester en fonction de la durée de vieillissement hydrique.

En conclusion, cette étude a permis de mettre en évidence le rôle clé de la tenue au vieillissement hydrique de la matrice polyester dans la tenue à long terme des matériaux sandwichs entrant dans la

fabrication des pales d'éolienne en mer. Ce résultat avait déjà été observé pour des matériaux à base de résine époxy [6-11]. Il convient de noter que la résine isophtalique choisie pour cette étude, bien que spécifiquement adaptée au milieu marin, n'en subit pas moins un vieillissement important.

En termes de perspective, une équivalence entre cette étude de laboratoire (immersion à 40°C d'éprouvette dont les 6 faces sont en contact avec l'eau) et les conditions de service (humidité relative et température variable, seule la face externe des voilures de pales est en contact avec l'environnement extérieur) reste à faire.

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] S. Huguet, N. Godin, R. Gaertner, L. Salmon, D. Villard « Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester », *Composites Science and Technology* Vol. 62 n° 10–11, pp. 1433–1444, 2002.
- [2] M. Fehri « Comportement mécanique et hydrique des composites renforcés par des fibres naturelles et/ou conventionnelles », Ph.D. thesis, Université de Caen Normandie, 2018.
- [3] M. Ben Ameer « Caractérisation mécanique et suivi par émission acoustique des mécanismes d'endommagement des composites à fibres hybrides lin/carbone », Ph.D. thesis, Université du Mans, 2019.
- [4] M. Ng. « A note on contained k-means algorithms », *Pattern Recognition* Vol. 33 n° 3, pp. 515–519, 2000.
- [5] A. Likas, N. Vlassis, J. Verbeek « The global k-means clustering algorithm », *Pattern Recognition* Vol. 36 n° 2, pp. 451–461, 2003.
- [6] G. Kotsikos, J.T. Evans, A.G. Gibson, J. Hale « Use of acoustic emission to characterize corrosion fatigue damage accumulation in glass fibre reinforced polyester laminates », *Polymer Composites* Vol. 20 n° 5, pp. 689–696, 2004.
- [7] S. Barré and M. Benzeggagh « On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass fibre reinforced polypropylene », *Composites Science and Technology* Vol. 52 n° 3, pp. 369–376, 1994.
- [8] N. Tual « Durability of carbon epoxy composite for tidal turbine blade applications », Ph.D thesis, Université de Bretagne Occidentale, 2016.
- [9] A. Le Guen-Geffroy, P. Davies, P. Y. Le Gac, B. Habert « Influence of seawater ageing on fracture of carbon fiber reinforced epoxy composites for ocean engineering », *Oceans* Vol. 1 n° 4, pp.198–214, 2020.
- [10] J. E. Morgan, R.J. and O'Neal « The durability of epoxies » *Polymer-Plastics Technology and Engineering* Vol. 10 n°1, pp. 49–116, 1978.
- [11] P. Nogueira, C. Ramírez, A. Torres, M. J. Abad, J. Cano, J. López, I. López-Bueno, L. Barral « Effect of water sorption on the structure and medical properties of an epoxy resin system », *Applied Polymer* Vol. 80 n° 1, pp.71–80, 2001.
- [13] NOESIS : <https://mistrasgroup.fr/>
- [14] KINETECH : <https://www.mat-ing.com/fr/>