



HAL
open science

Prise en compte du vieillissement couplé hygro-mécanique de pales de structures éoliennes en milieu marin

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

► **To cite this version:**

El Hadji Amadou Ba, Khalid Aoujdad, Florian Gehring, Alexandre Vivet, Mounsif Ech-Cherif El-Kettani, et al.. Prise en compte du vieillissement couplé hygro-mécanique de pales de structures éoliennes en milieu marin. JNC23: Journées Nationales sur les Composites 2023, AMAC, UFC, Supmicrotech-ENSMM, CNRS, Jul 2023, Besançon, France. hal-04606810

HAL Id: hal-04606810

<https://hal.science/hal-04606810>

Submitted on 10 Jun 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.

Prise en compte du vieillissement couplé hygro-mécanique de pâles de structures éoliennes en milieu marin (EMR)

Consideration of coupled hygro-mechanical aging of wind turbine blades in the marine environment (EMR)

El Hadji Amadou BA¹, Khalid AOUSDAD², Florian GEHRING¹ Alexandre VIVET¹ Mounsi Ech-Cherif EL-KETTAN² Damien LEDUC² Pierre MARECHAL²

1 : Normandie Univ, ENSICAEN, UNICAEN, CEA, CNRS, CIMAP, 14000 Caen, France
e-mail : elhadji-amadou.ba@etu.unicaen.fr et alexandre.vivet@unicaen.fr

2 : LOMC : Normandie Univ, UNIHAVRE, CNRS, LOMC, 76600 Le Havre, France
e-mail : khalid.aoujdad@etu.univ-lehavre.fr

Résumé

La compréhension de la cinétique et des mécanismes d'endommagement restent essentielle dans l'étude de la mécanique de rupture de nos structures sandwich représentatives des pâles d'éoliennes en milieu marin. En effet, c'est dans cet optique que, des échantillons composites stratifiés UD en fibre de verre dans une résine de polyester et sandwichs composés d'une âme en mousse de SAN et de peaux en UD de verre. Ces échantillons qu'ils soit vierges et vieillis sont soumis à des tests de flexion dans le but de comprendre les mécanismes d'endommagement. Pour la première structure, la classification des signaux acoustiques a fait apparaître 4 mécanismes d'endommagement avec chacune sa signature acoustique à savoir : la fissuration matricielle, la décohésion interface fibre/matrice, le délaminage et enfin la rupture de fibres. Au niveau des deux structures sandwich (vierges et vieilles), tous ces mêmes mécanismes d'endommagement sont apparus et s'y est ajoutée la décohésion interface âme/peaux. Le but est dans un premier temps de comprendre ce qui passe au niveau des peaux (composite UD verre/polyester) en terme de mécanisme rupture. Dans un second temps, le but est de comprendre l'influence du vieillissement sur les mécanismes d'endommagement en comparant ces mécanismes des sandwichs vierges avec ceux vieillis.

Abstract

Understanding the kinetics and damage mechanisms remains essential in the study of the fracture mechanics of our sandwich structures representative of wind turbine blades in the marine environment. Indeed, it is with this in mind that composite samples laminated UD in fiberglass in a polyester resin and sandwiches composed of a core in SAN foam and skins in UD glass. These samples, whether virgin or aged, are subjected to bending tests in order to understand the damage mechanisms. For the first structure, the classification of the acoustic signals revealed 4 damage mechanisms, each with its own acoustic signature, namely : matrix cracking, fibre/matrix interface decohesion, delamination and finally fiber rupture. At the level of the two sandwich structures (virgin and aged), all these same damage mechanisms appeared and to this was added the core/skin interface decohesion. The goal is first to understand what happens to the skins (UD glass/polyester composite) in terms of the rupture mechanism. Secondly, the goal is to understand the influence of aging on the damage mechanisms by comparing these mechanisms of the virgin sandwiches with those aged.

Mots Clés : Vieillissement, Structure Sandwich, Émission Acoustique, Endommagement, Mécanique

Keywords : Aging, Sandwich Structure, Acoustic Emission, damage, Mechanical

1. Introduction

La loi relative à la transition énergétique [1], votée le 17 Août 2015, a pour but de favoriser la part de l'énergie verte dans le mixte énergétique en France. L'éolien (milieu marin + terrestre) a donc pour objectif une production d'électricité de 10 GW en 2028. Ce qui représente une production de 10 réacteurs nucléaires et 20 % du mixte énergétique total. [2] L'étude se porte sur la compréhension des mécanismes d'endommagement au niveau des pales d'éoliennes en milieu marin. Les pales d'éolienne sont constituées de structures composites complexes. En fonction de la longueur de la pale chaque constructeur utilise ses propres matériaux et développe sa propre stratégie de conception. Pour la plupart des pales, une structure globale en structure sandwich dont les peaux sont en composites stratifié fibre de verre/résine thermodurcissable et dont l'âme est en mousse polymère (ou en balsa) avec des renforts localisés faits avec des lames de stratifié en fibre de carbone. Cette structure est privilégiée car représentant le meilleur compromis tenue mécanique, coût économique, capacité de fabrication. Ces pâles d'éolienne marine subissent, en service, des sollicitations couplées mécaniques et environnementales (torsion, flexion, force centrifuge, impact, humidité, température, salinité ...) [3]. L'ensemble de ces sollicitations génèrent des endommagements et un vieillissement des structures en service. Pour minimiser les opérations de maintenance et optimiser leur durée de vie, le projet COSPHI, collaboration entre 2 laboratoires normands LOMC et CIMAP et soutenu par le Labex EMC3, a pour objectif d'évaluer la faisabilité de la méthode de contrôle in situ de ces pâles d'éolienne.

Dans cet optique les sollicitations couplées hygro-mécaniques (flexion, torsion, impact, vieillissement) sont reproduites à l'échelle du laboratoire sur des structures sandwich représentatives des matériaux constituant les pâles. De plus, les algorithmes de traitement numérique développés au sein des logiciels d'émission acoustique permettent de classer les endommagements détectés par famille et ainsi de mieux cerner les cinétiques d'apparition et de développement de ces endommagements.

Les travaux présentés dans ce document se concentrent sur la partie identification des endommagements en fonction du vieillissement en milieu marin d'éprouvettes sandwich, avec une étude comparative du comportement en flexion 3 et 4 points, monotone ou en chargement répété progressif, d'éprouvettes sandwich non vieilles et vieilles en eau de mer à 40° C durant 16 semaines.

2. Structure Sandwich

La structure et les matériaux utilisés pour faire des pales d'éolienne ont beaucoup changé depuis l'avènement des éoliennes à axe horizontale.[5]. En effet, les évolutions technologiques ont fait que les pâles sont de plus en plus grandes dans le seul but d'augmenter leur rendement énergétique. Du coup les matériaux comme l'aluminium et l'acier utilisés depuis lors sont lourds. Les matériaux tels que bois, l'aluminium et l'acier utilisés pour fabriquer les premières pâles ont été progressivement remplacés par des structures sandwich, plus légères et plus faciles à fabriquer à très grande taille. Les grandes pâles actuellement sont construites selon le modèle de longeron porteur interne, prenant en charge la plupart des efforts et soutenant les surfaces aérodynamiques externes qui ne sont pas assez rigides pour conserver leur forme lorsqu'elles sont soumises aux différents chargements. Ces surfaces sont faites de panneaux sandwich avec des peaux en composite stratifié unidirectionnelle en fibre de verre avec un noyau fait en mousse de SAN (C 70.55) [5].

En effet le longeron qui prend en charge la plupart des efforts. Les surfaces aérodynamiques ne sont pas assez rigides pour conserver leur forme lorsque soumises aux différents chargements. Ce choix est à la fois motivé par le fait qu'il faudra alléger la masse des pâles qui font 108 mètres et par le fait que le coût de la mousse réduit considérablement le prix global de la pale pour une entreprise spécialisée.

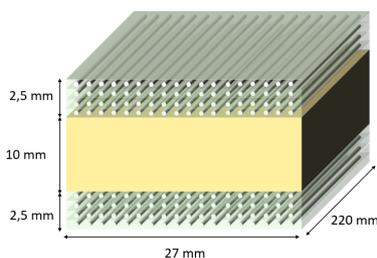


FIG. 1. – Courbe de reprise d'eau des échantillons en composite sandwich S1

Ce document se concentre sur les surfaces externes, les longerons porteurs étant aussi étudiés par ailleurs. La structure choisie pour représenter les éléments externes de la pale d'une éolienne est une poutre sandwich de dimensions $200 \times 20 \times 3.5$ mm et est formée :

- d'une âme en mousse SAN (C 70.55) de 10 millimètres d'épaisseur et de masse volumique 60 Kg.m^{-3} . C'est une mousse rigide à cellule fermée.

- de deux peaux en UD avec des fibres en verre orientées à 0° par rapport à l'axe principal de l'éprouvette dans une matrice de polyester formées. Chaque peau est faite de 4 plis de renfort avec un taux de fibre autour 35 %. Chaque peau a une épaisseur de 2.7 mm.

En plus des matériaux sandwich, des éprouvettes de même composite que les peaux ont été produites et testées dans les mêmes conditions afin de différencier les sources d'endommagement entre peaux et âme.

3. Dispositifs Expérimentaux, vieillissement et essais mécaniques

3.1. Vieillissement hydrique

Le laboratoire LOMC partenaire du projet COSPHI dispose de cuves alimentées en eau de mer et thermostatées à 40°C. Ce procédé a été choisi car il permet d'accélérer le vieillissement hydrique en conditions naturelles. Plusieurs lots d'éprouvettes sandwich ont été immergées pour être testées à différents niveaux de vieillissement. Ce document se concentre sur le 1^{er} lot immergé durant 16 semaines.

3.2. Cinétique d'absorption d'eau

Afin de suivre leur reprise d'eau, les éprouvettes sandwich immergées, sont sorties régulièrement du bain pour être pesées. Précédemment un lot de 3 éprouvettes a été immergée dans de l'eau distillée à la température de 20°C. Avant immersion, ces dernières ont été séchées au four durant 16 heures à 130° C. Ce séchage leur a fait perdre moins de 1 % de leur masse initiale. Après les mêmes conditions de séchage, des éprouvettes ont été plongées dans de l'eau de mer maintenue à la température de 40°C afin d'accélérer le vieillissement hydrique dans le but mieux approcher des conditions de reprise d'eau en milieu marin des pales d'éolienne off-shore. C'est un vieillissement dit accéléré, le but est voir l'effet de la température sur la reprise d'eau et la nécessité de réaliser ce type de vieillissement sur les structures sandwich. L'étude de la reprise d'eau à 40°C des sandwiches, a été entamée beaucoup plus tard que celle à 20°C dans de l'eau distillée, pour des raisons techniques. Ce qui permet expliquer le fait que cette étude de reprise d'eau à 40°C s'arrête à 500 heures. Ce lot d'éprouvettes n'est destinée qu'à l'étude de reprise d'eau sur les sandwiches, de ce fait elles ne seront pas mises dans le même lot des éprouvettes vieilles qui seront testées mécaniquement.

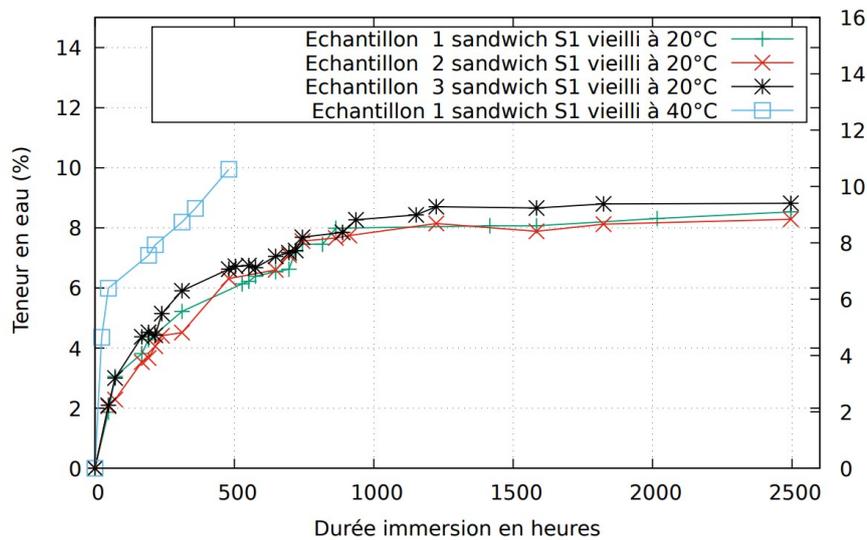


Fig. 2. – . Courbes de reprise d'eau de structures sandwich lors de vieillissement

Tous les échantillons sandwich ont subi une diffusion 3D. Comme le montre la *figure 2*, les éprouvettes subissant un vieillissement normal à 20°C ont une absorption stable à 9 % au bout de 1000 heures. Quant à l'éprouvette en vieillissement accéléré, la teneur en eau est déjà 10 % au bout de 500 heures. Ce qui montre que la température joue un rôle important sur la cinétique d'absorption des structures sandwichs.

La courbe de reprise d'eau permettra d'avoir une idée sur la teneur en eau des éprouvettes sandwichs testés mécaniquement. Ces éprouvettes ont été vieillies dans des cuves remplies d'eau marine à 40° C pendant 16 semaines (2688 heures). En effet, elles ont été immergées bien en amont de cette étude de reprise d'eau des lots d'éprouvettes à 20°C et à 40°C.

3.3. Dispositif de flexion 3 et 4 points

Les éprouvettes en composite UD verre/polyester et en sandwich sont testées mécaniquement en flexion 3 points monotone, en flexion 3 points CPR (Charges Progressives Répétées), en flexion 4 points monotone et en flexion 4 points CPR. Pour les essais, la machine Instron 8800 de la *figure 3* utilisée, elle est équipée d'une cellule de force de 50 KN. Le pilotage des essais flexion monotone est en déplacement à une vitesse de déplacement de 2 mm/min et les essais flexion CPR pilotés en charge avec des vitesses d'effort en KN/s. Les essais de flexion sur les éprouvettes sandwichs sont réalisés suivant la norme ISO NFT54-606 et sur les composites UD verre suivant la norme ISO 14125.

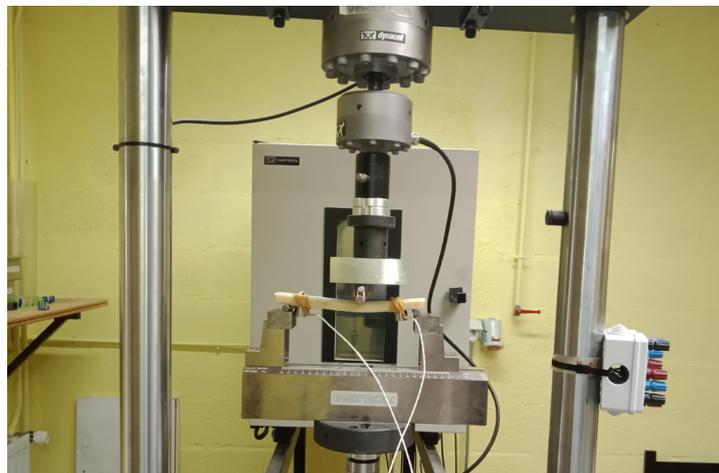


Fig. 3. – . Dispositif expérimental lors des essais de flexion 3 points norme ISO NFT54-606 sur les sandwichs

3.4. Suivi par émission acoustique

Le suivi par émission acoustique est une méthode de contrôle non destructif utilisée pour une meilleure compréhension des mécanismes d'endommagement du matériau. [4]. Une transformation de la microstructure interne d'un matériau engendre, en général, une libération d'énergie élastique se propageant sous forme d'ondes élastiques transitoires et provoquant un phénomène acoustique. Cette méthode permet de détecter la création d'un défaut ou la croissance d'un défaut préexistant mais ne permet pas de détecter un défaut préexistant et qui reste passif. Les principaux types d'endommagements au sein d'un matériau composite UD sont : la fissuration matricielle, la décohésion interfaciale fibre/matrice ou rupture intralaminare, la rupture de fibres, le délaminage ou rupture interlaminare [4]. Cependant d'autres phénomènes physiques peuvent être la source d'une émission acoustique à savoir la déformation plastique (mouvements de dislocations), les frottements et enfin les bruits extérieurs à l'essai en cours.

La réalisation de ces essais avec suivi d'émissions acoustiques nécessite des capteurs piézo-électriques qui transforment les ondes

mécaniques en ondes acoustiques et un ordinateur permettant l'acquisition des données. Les capteurs utilisés sont des capteurs dits à "large bande". Le signal acoustique émis est très peu modifié cependant ces capteurs présentent une faible sensibilité. Après acquisition, une phase de traitement des signaux acoustiques émis, grâce au logiciel Noesis, donne une classification des signaux acoustiques de même nature en groupes appelés "clusters" ou classes suivant un nombre de paramètres caractéristiques des ondes sonores, appelés classificateurs. En fonction des algorithmes et des classificateurs utilisés, les groupes de signaux peuvent différer. Le classificateur le plus commun est l'amplitude de l'onde sonore. Variant de de 40 à 100 dB, ce critère permet en 1ère approche une 1ère séparation des évènements détectés. Pour cette étude 5 classificateurs ont été choisis : amplitude (dB), énergie (aJ), durée (μ s), nombre de coups, temps de montée (μ s).

4. Résultats et discussion

4.1. Résultats

4.1.1. Composite UD verre/polyester

Dans cette partie, pour mieux décrire les mécanismes d'endommagement, les résultats d'éprouvettes testées en flexion 3 points monotone et CPR sont utilisés à travers l'illustration des figures 4A et 4B. Dans ce graphe, le but est faire une corrélation entre les évolutions du nombre d'évènements, de l'énergie cumulée de ces évènements et la répartition des amplitudes sonores des signaux acoustiques lors de chaque essai de flexion.

L'émission acoustique a permis de faire la classification des signaux acoustiques en 4 types d'endommagement, certains évènements sont considérés comme étant de la fissuration matricielle, d'autres de la décohé sion fibre/matrice, d'autres du délaminage et enfin les derniers comme de la rupture de fibres. Chaque mécanisme d'endommagement à sa signature acoustique qui lui est propre.

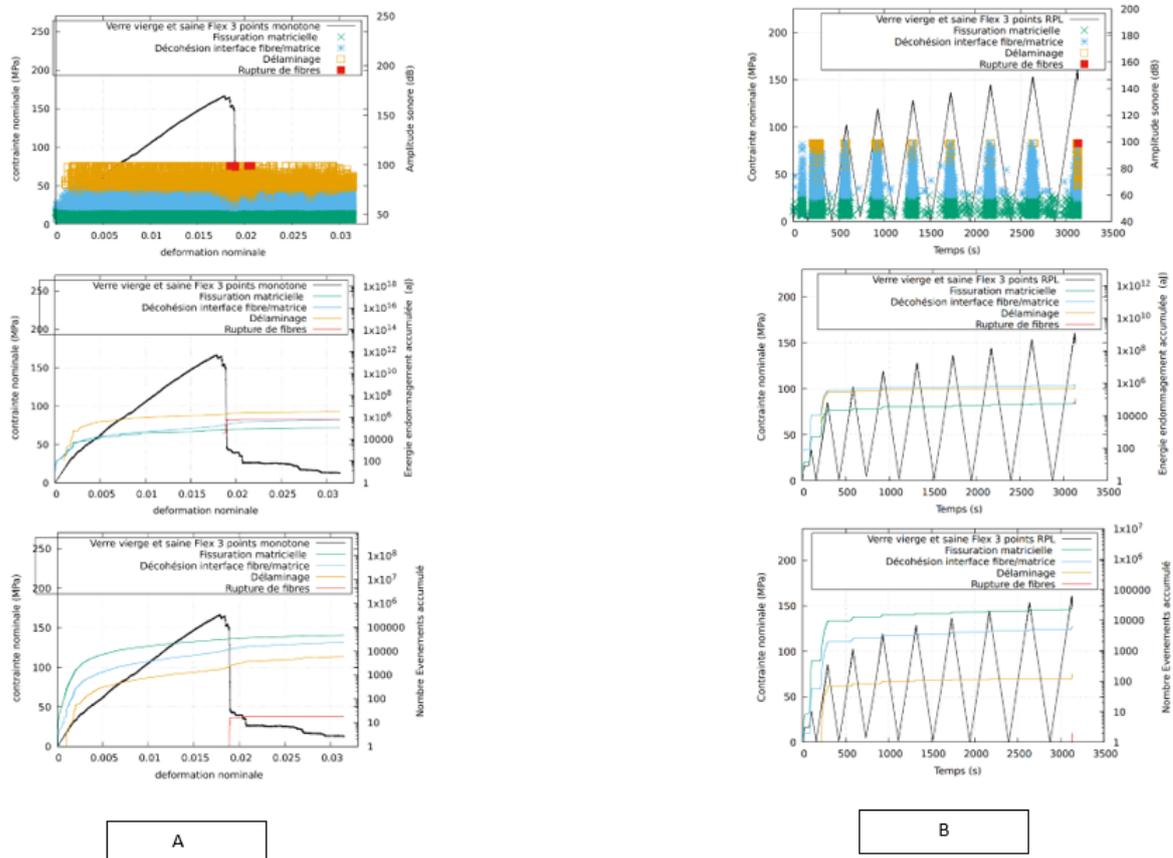


Fig. 4. – A : Répartition des classes d'endommagement pour un composite stratifié UD verre/polyester en flexion 3 points monotone B : Répartition des classes d'endommagement pour un composite stratifié UD verre/polyester en flexion 3 points à charges progressives répétées

Les figures 4A et 4B illustrent la répartition de l'amplitude sonore des signaux des différentes classes d'endommagement en fonction de l'évolution de la contrainte nominale en fonction de déformation nominale. Elles illustrent aussi l'évolution du nombre d'évènements de chacune de ces classes ainsi l'évolution de leur énergie cumulée pour des essais de flexion 3 points monotone et à charges progressives et répétées (CPR). En ce qui concerne l'amplitude sonore des salves, la répartition des mécanismes d'endommagement reste la même quelque soit le type d'essai : fissuration matricielle (basses amplitudes), décohé sion fibre/matrice (amplitudes moyennes), délaminage (amplitudes élevées) et la rupture de fibres (amplitudes très élevées)[7] [8]. Les endommagements associés à la fissuration matricielle apparus au début de l'essai monotone, augmentent fortement en nombre puis au fur et à mesure de l'essai il y a une stabilisation de ce nombre à 97 000. L'énergie cumulée de ce mécanisme d'endommagement suit la même évolution que le nombre d'évènements de ces

fissures. Pour l’essai CPR, Le nombre des fissures matricielles augmente rapidement durant les 3 premières charges et décharges avant de se stabiliser 26000. L’énergie cumulée de ces événements augmente de manière très lente durant tout l’essai mécanique.

COMPOSITE UD VERRE/POLYESTER non vieilli

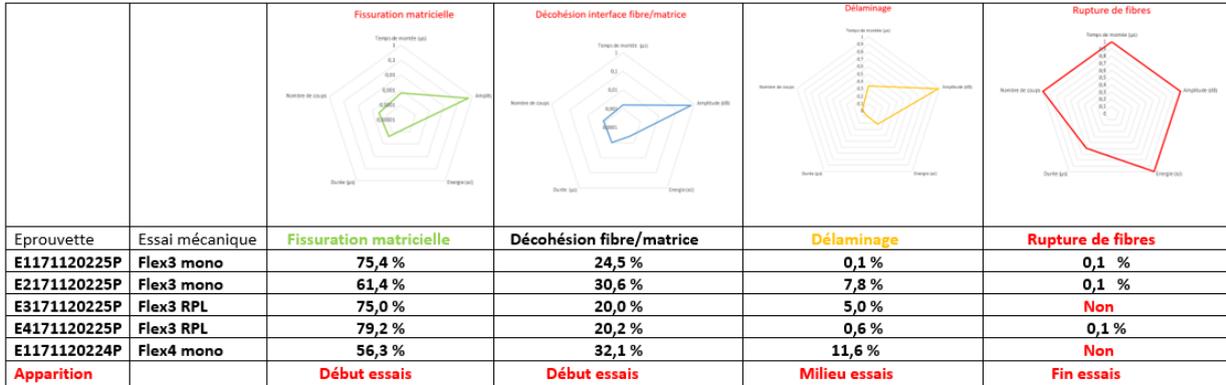


Fig. 5. – . Pourcentage du nombre d’événements de chaque mécanisme d’endommagements du composite verre/polyester vierge pour des essais de flexion 3 points

La figure 5 décrit les différents caractéristiques des mécanismes d’endommagement sur des composites UD verre/polyester testés en flexion 3 monotone et avec des chargements progressifs répétitifs.

En ce qui concerne les endommagements considérés comme étant la fissuration matricielle, les événements apparaissent des le début de l’essai, avec des amplitudes sonores tres faibles (< 55 dB). Ces évènements sont tres brefs (durée moyenne < 150 μs) et tres peu énergétiques (< 5 aJ par événement).

La décohésion au niveau des interfaces fibre/matrice est présente des le début du chargement mécanique, elle represente 20 voir 30 % des évènements totaux. Ces évènements ont des amplitudes compris entre 60 et 75 dB et des durées comprises entre 200 et 1300 μs.

Le délaminage apparaît lorsqu’il y a un changement de pente de la courbe Contraintes-Déformations dans le domaine d’élasticité linéaire. Ce mécanisme représente moins de 5 % des évènements, qui restent énergétiques (soit entre 500 et 15000 aJ par événement).

Les évènements affectés à de la rupture de fibres sont apparus juste avant la rupture de la structure avec des amplitudes tres importantes, autour de 99 dB. Ces évènements sont très peu nombreux (moins de 1 %) et tres énergétiques, soit plus 65 000 aJ par évènement. Les durées des ruptures de fibres sont tres importantes soit en moyenne 32 000 μs par salve.

4.1.2. Structure sandwich (peaux en verre/polyester et âme en mousse de SAN) vierge et vieilli 16 semaines

Dans cette partie, les éprouvettes sandwich vierges et vieilles sont testées en flexion 4 points CPR pour illustrer les mécanismes d’endommagement. Les éprouvettes vieilles ont subi un vieillissement accéléré dans de l’eau marin à 40°C durant 16 semaines.

La figure 6A illustre l’évolution des mécanismes d’endommagement lors d’un essai de flexion 4 points à charges progressives répétées pour la structure sandwich vierge. La figure 6B illustre la même évolution pour la structure sandwich vieilli à 16 semaines. Chaque structure a subi 7 charges progressives dont la valeur maximale de contrainte σ_{max} est de 32 MPa pour la structure vierge et de 35 MPa pour la structure vieilli. Pour les deux structures, la répartition des amplitudes des évènements reste quasiment la même pour la fissuration matricielle (basses amplitudes), la décohésion fibre/matrice (amplitudes moyennes), la décohésion âme/peau (amplitudes moyennes plus), le délamiage (amplitudes élevées) et les ruptures de fibres (amplitudes tres élevées) [7]. Tous les mécanismes d’endommagement sauf la rupture de fibres, sont apparus au début de l’essai CPR. Leur nombre augmente de manière progressive entre les cycles de charges et décharges jusqu’à la fin de l’essai que cela soit la structure sandwich vierge et la structure sandwich vieilli 16 semaines. Les évènements associés à la rupture de fibres pour les deux structures apparaissent toutes à la fin de la septième charge.

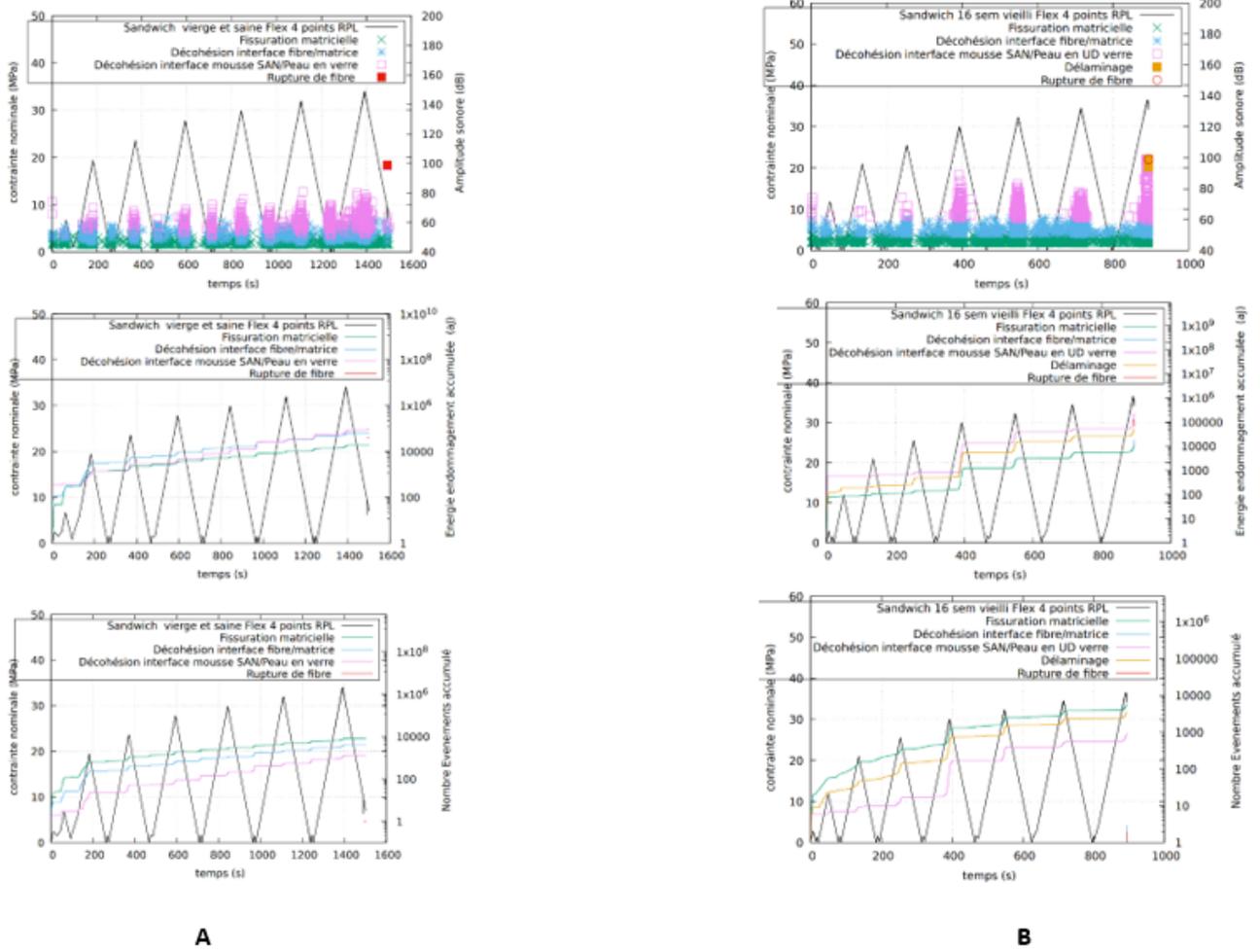


FIG. 6. – A : Répartition des classes d’endommagement pour un sandwich vierge en flexion 4 points CPL
 B : Répartition des classes d’endommagement pour un sandwich 16 semaines vieilli en flexion 4 points CPL

SANDWICH (Peau : UD VERRE/POLYESTER et Âme : MOUSSE SAN) non vieilli

Eprouvette	Essai mécanique	Fissuration matricielle	Décohésion fibre/matrice	Décohésion âme/peau	Délaminage	Rupture de fibres
E31101202319P	Flex3 mono	58.1 %	32.0 %	9.9 %	Non	0.1 %
E101101202319P	Flex3 mono	50.8 %	31.7 %	17.3 %	0.2 %	Non
E81101202319P	Flex3 RPL	68.5 %	30.3 %	5.4 %	Non	Non
E31101202320P	Flex3 RPL	58.4 %	26.1 %	10.0 %	1.3 %	Non
E71101202320P	Flex4 mono	67.4 %	16.5 %	Non	16.1 %	Non
E111606202250	Flex4 mono	75.4 %	Non	22.8 %	1.9 %	Non
E121101202319P	Flex4 RPL	73.7 %	Non	25.0 %	1.3 %	0.1 %
E131101202319P	Flex4 RPL	60.1 %	30.2 %	9.6 %	Non	0.1 %
Apparition		Début essais	Début essais	Début essais	Début essais	Fin essais

FIG. 7. – . Pourcentage du nombre d'événements de chaque mécanisme d'endommagements du sandwich vierge pour des essais de flexion 3 points

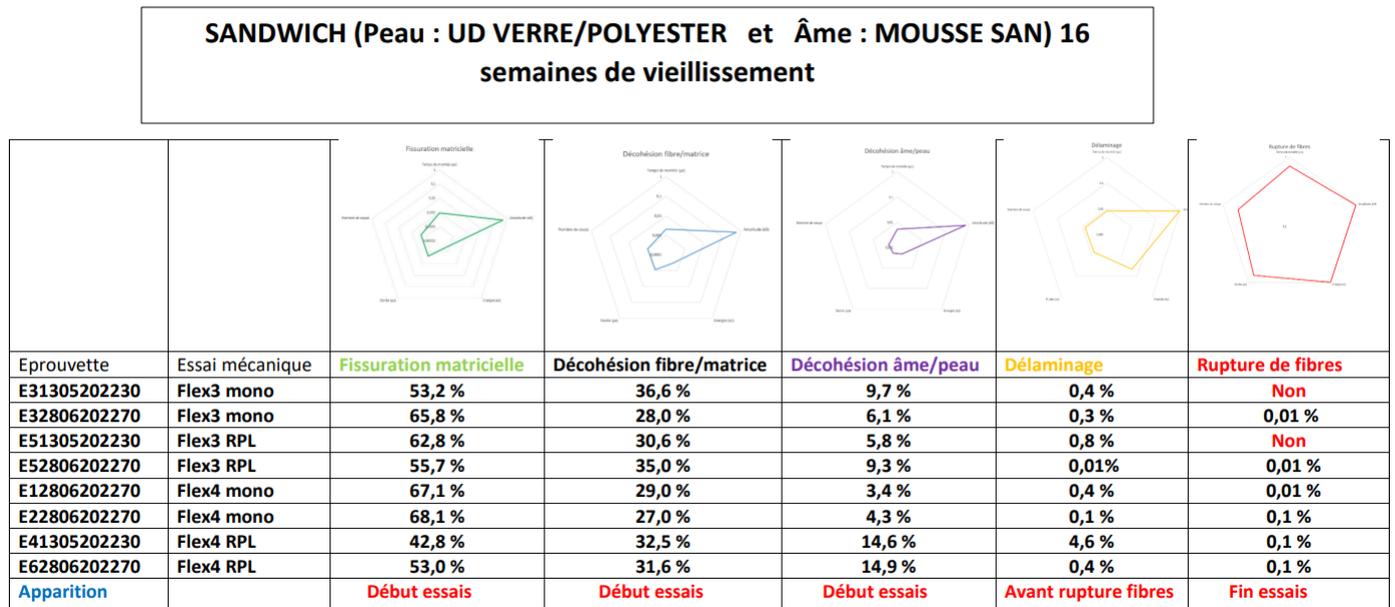


FIG. 8. – . Pourcentage du nombre d'événements de chaque mécanisme d'endommagements du sandwich vieilli 16 semaines pour des essais de flexion 3 points

Les figures 7 et 8 permettent de décrire respectivement les différentes caractéristiques des mécanismes d'endommagement sur des structures sandwich saines et vieilles 16 semaines, testées en flexion 3 monotone et avec des chargements progressifs répétitifs.

En ce qui concerne les endommagements considérés comme étant la fissuration matricielle, les événements apparaissent dès le début de l'essai, avec des amplitudes sonores très faibles (soit une moyenne < 50 dB) pour les structures saines et vieilles. Ces événements sont très brefs, soit une durée moyenne < 200 μ s pour les sandwichs sains et une durée moyenne < 160 μ s pour ceux vieillis. Et en dernier, ces signaux restent très peu énergétiques, soit moins de 15 aJ par événement, pour les structures saines et moins de 4 aJ par événement pour celles vieilles.

La décohésion au niveau des interfaces fibre/matrice est présente dès le début du chargement mécanique. Elle représente entre 20 et 30 % des événements totaux pour les sandwichs sains et entre 27 et 37 % événements totaux pour les structures vieilles. Ces événements ont des amplitudes assez faibles compris entre 54 et 60 dB et des durées comprises entre 350 et 990 μ s.

Les événements liés à la décohésion au niveau des interfaces âme/peau sont captés dès le début du chargement mécanique. Ils sont entre 5 et 15 % des signaux de l'ensemble des endommagements. Les amplitudes de ces signaux couvrent une large bande soit entre 50 et 70 dB pour les éprouvettes non vieilles et entre 67 et 80 dB pour celles vieilles 16 semaines. Ces événements sont un peu plus énergétiques que ceux de la décohésion aux interfaces fibre/matrices, soit entre 20 et 80 aJ par événement pour les structures saines et entre 86 et 330 aJ pour celles vieilles. Les durées moyennes de ces signaux sont comprises en 700 et 1500 μ s.

Le délaminage apparaît dès le début du chargement mécanique. Ce mécanisme représente moins de 2 % des événements, qui restent énergétiques, soit une valeur maximale de 12000 aJ par événement pour les structures saines et 30000 aJ pour les structures vieilles. Les amplitudes de ces signaux restent très élevées, entre 90 et 99 dB.

Les événements affectés à la rupture de fibres sont apparus juste avant la rupture de la structure avec des amplitudes très importantes, autour de 99 dB. Ils sont très minoritaires, près de 0,1 % du total et très énergétiques, une valeur maximale de 30000 aJ par événement pour les éprouvettes non vieilles et une valeur maximale de 66000 aJ pour celles vieilles à 16 semaines. La durée des ruptures de fibres reste très importante soit plus 30 000 μ s par save pour les saines et plus de 40 000 μ s pour les vieilles.

4.2. Discussion

1) La comparaison des résultats entre les structures composites UD et sandwich S1 vierge (Figure 5 et figure 6) montre que tous les mécanismes d'endommagement issus de la classification des composite UD verre/polyester sont présents au niveau des peaux des sandwichs. La fissuration matricielle est le mécanisme avec la plus grande fréquence d'apparition, plus de la moitié des événements (60 % des salves) caractérisée par des amplitudes faibles (40 - 50 dB) et des énergies très faibles (< 5 aJ par événement) [8]. Elle est présente durant tout le déroulement du chargement mécanique, c'est aussi le cas de la décohésion des interfaces fibre/matrice. Cette décohésion représente un tiers des événements, caractérisée par des amplitudes sonores un peu plus élevées (60 - 75 dB) et des énergies aussi un peu plus élevées (en moyenne 70 aJ par événement). Le troisième mécanisme d'endommagement, le délaminage, est caractérisé par un faible nombre d'événements (moins de 5 %) ayant des amplitudes sonores élevées (80 - 95 dB). Ces événements sont aussi très énergétiques (500 à 1500 aJ par save) et apparaissent lors du changement de pente des courbes Contraintes-Déformations dans la zone élastique linéaire. Et enfin les ruptures de fibres apparaissent juste avant la rupture de la structure, elles sont très peu nombreuses, avec des amplitudes très élevées (99 dB) et une énergie très importantes (> 65 000 aJ par save). (Figure 4)

2) La comparaison des résultats de l'émission acoustique (Figure 6) des différentes structures sandwich montre un vieillissement de la matrice du fait que des événements trois fois moins énergétiques provoquent la fissuration matricielle des sandwichs vieillis. Et, en

plus, il y a une diminution de 10 % des fissures au sein cette matrice polyester. Le même phénomène est observé pour la décohésion au niveau des interfaces fibre/matrice, des événements 3 fois moins énergétiques même si cette fois ci le nombre d'évènements de ce type progresse. Cela montre un début de vieillissement des interfaces fibre/matrice. Les événements de décohésion âme/peaux sont entre 5 et 10 fois plus énergétiques avec le vieillissement, accompagnés d'une faible augmentation de leur amplitude sonore. Le vieillissement a réduit faiblement le nombre d'évènements de délaminage qui ont des amplitudes sonores très élevées voir proches de celles de la rupture de fibre et qui sont 10 % plus longs. Les ruptures de fibres deviennent un peu plus énergétiques et durent plus longtemps (25 % en plus) avec l'absorption d'eau. De ce fait, on peut en conclure que, ni les zones interlaminaires au niveau des peaux, ni les fibres de verre n'ont été détériorées à cette étape de vieillissement. Le vieillissement à 16 semaines ne change rien la cinétique des endommagements du type fissuration matricielle, décohésions fibre/matrice, âme/peaux et du délaminage présents au début des chargements mécaniques. C'est le cas aussi de la rupture des fibres qui n'apparaît qu'en fin d'essais juste avant la rupture. La comparaison des *figure 7 et 8* montre presque à chaque essai de flexion sur des sandwich vieillis il y a des ruptures de fibres.

5. Conclusion

L'objectif de cette étude a été d'étudier et de comprendre les mécanismes d'endommagement se déroulant d'abord au niveau des peaux des sandwichs qui constituent les zones les plus endommagées généralement. Ensuite, l'étude s'est focalisée sur l'influence du vieillissement des échantillons sur la cinétique et les mécanismes d'endommagement des structures sandwichs. En somme, les résultats des composites UD verre/polyester permettent de décrire ce qui se passe au niveau des peaux des sandwich sous chargement mécanique. La fissuration matricielle et les types de décohésion constituant l'essentiel des évènements apparaissent tout au début du chargement affectent peu la santé de la structure. Le délaminage assez peu nombreux lors de son apparition provoque un changement de pente de la courbe Contraintes-Déformations ce qui signifie une chute du module d'élasticité. Et enfin les ruptures de fibres très peu nombreuses, apparaissent vers la fin du chargement et s'en suit la rupture de la structure. Le vieillissement accéléré à 16 semaines dégrade la matrice polyester, les zones intralaminaires. Cependant les zones interlaminaires et les fibres restent intactes. Même si on peut un peu nuancer en disant que presque à chaque fois, il y a une rupture de fibres pour les structures sandwichs vieilles durant 16 semaines, ce qui n'est pas le cas des structures sandwich saines. Un mécanisme d'endommagement d'âme n'ayant pas apparu donc la mousse SAN (C70.55) n'est pas encore dégradée, elle aussi.

Dans les perspectives, il y a l'étude de l'influence de l'impact dynamique sur les mécanismes d'endommagement au niveau des structures sandwichs. Une identification de ces mécanismes et une étude de leur cinétique de propagation seront réalisées sur des éprouvettes sandwich saines puis vieilles, impactées au centre.

Remerciements

The authors acknowledge the financial 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] "LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte", Titre V : FAVORISER LES ÉNERGIES RENOUVELABLES POUR DIVERSIFIER NOS ÉNERGIES ET VALORISER LES RESSOURCES DE NOS TERRITOIRES (Articles 104 à 122)
- [2] ADEM "L'Énergie éolienne", Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, rapport produit en avril 2016
- [3] W.C. de Goeij, M.J.L. van Tooren, A. Beukers "Implementation of bending-torsion coupling in the design of wind-turbine rotor blade ", Faculty of Aerospace Engineering, Section Production Technology, Delft University of Technology
- [4] Stéphane HUGET "Application de classificateurs aux données d'émission acoustique : identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans les composites à matrice polymère" , INSA LYON, décembre 2002
- [5] Louis-Charles FORCIER "CONCEPTION D'UNE PALE D'ÉOLIENNE DE GRANDE ENVERGURE À L'AIDE DE TECHNIQUES D'OPTIMISATION STRUCTURALE", L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE, Thèse soutenue le 3 Août 2010
- [6] Zeineb KESSENTINI "Influence de l'humidité sur le comportement en statique et en dynamique d'un composite PLA/Lin", Le Mans Université, Unité de recherche : LAUM - Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans - UMR CNRS 6613, thèse présentée et soutenue le 09/12/2022 Thèse N° : 2022LEMA1043
- [7] Sami Allagui "Développement et caractérisation d'un composite biosourcé instrumenté et recyclable" Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Le Mans Université ; Université de Sfax (Tunisie), 2021. Français. ffnnt : 2021LEMA1025ff. fftel-03656078f
- [8] Meriem FEHRI "Comportement mécanique et hydrique des composites renforcées par des fibres naturelles et/ou conventionnelles" CIMAP UMR 6252 Université Caen Normandie, Mai 2018