

Analyse du vieillissement hygroscopique à long terme de structures sandwichs composites biosourcés à l'aide de l'émission acoustique

Analysis of the long-term hygroscopic ageing behavior of bio-composite sandwich structures with acoustic emission

Yuan Wu¹, Pascal Casari¹, Sylvain Fréour¹, Jamal Fajoui¹, Marianne Perrin², Marie-Laetitia Pastor² et Xiaojing Gong²

1 : IUT de Saint-Nazaire, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), CNRS, UMR 6183
Nantes Université, Ecole Centrale Nantes
58 Rue Michel Ange, F- 44600 Saint-Nazaire, France
e-mail : yuan.wu@univ-nantes.fr et Pascal.Casari@univ-nantes.fr

2 : Institut Clément Ader (ICA), CNRS, UMR 5312
Université de Technologie Tarbes Occitanie Pyrénées
1 Rue Lautréamont, F- 65010 Tarbes, France
e-mail : marianne.perrin@iut-tarbes.fr

Résumé

Ce travail étudie le comportement du vieillissement hygroscopique à long terme de structures sandwichs biosourcées à âme de balsa avec des peaux stratifiées en fibre de verre, à travers la caractérisation expérimentale basée sur l'essai d'immersion dans l'eau suivi par la mesure de la vitesse de l'onde d'émission acoustique (EA), ainsi que la modélisation numérique basée sur le modèle de diffusion Dual-Fick. Sur la base des relations entre la teneur en eau, la vitesse de l'onde d'EA et la rigidité du sandwich, une nouvelle méthodologie compte tenu de l'EA a été proposée afin de prédire la dégradation de la rigidité en fonction de la teneur en eau, ainsi que la localisation de la teneur en eau dans la peau fine et l'âme épaisse. Il est démontré que la rigidité en flexion diminue plus rapidement dans la phase initiale avant le point à 80 % de teneur en eau, tandis que la résistance diminue plus vite au cours de la période d'absorption ultérieure dans des conditions de vieillissement à long terme.

Abstract

This work investigates the long-term hygroscopic ageing behavior of bio-based sandwich structures with balsa core and glass fiber laminate skins, through the experimental characterization based on the water immersion test monitored by AE wave velocity measurement, as well as the numerical modeling based on the Dual-Fick diffusion model. Based on the relationships between moisture content, AE wave velocity and the stiffness of the sandwich, a new methodology considering AE was proposed to predict the stiffness degradation as a function of moisture content, as well as the localization of moisture content in the thin skin and the thick core. It is demonstrated that the bending stiffness decreases faster in the initial phase before the point at 80 % moisture content, while the strength reduces more quickly during the later absorption period under long-term aging condition.

Mots Clés : Vieillissement hygroscopique, matériaux composites biosourcés, Emission Acoustique (EA), modèles de diffusion d'eau, localisation de la teneur en eau

Keywords: Hygroscopic ageing, bio-based composite materials, Acoustic Emission (AE), moisture diffusion models, localization of moisture content

1. Introduction

Dans le cadre de la décarbonation du transport maritime, les matériaux composites biosourcés à base de fibres végétales [1] se développent pour des applications notamment pour les structures sandwichs composites à base de bois de balsa [2-3] et de lin. Une structure sandwich est composée d'une âme légère et de deux peaux fines rigides, conçues pour garantir une résistance mécanique et une rigidité spécifique suffisante. L'âme du matériau, plus écologique, pourrait réduire l'empreinte carbone de la structure sandwich, mais les fibres naturelles présentent souvent un caractère hydrophile marqué. Il s'ensuit que l'exposition à des conditions de vieillissement hygroscopique sévères peut entraîner une dégradation des propriétés mécaniques de ces matériaux [1-2]. De plus, le mécanisme de diffusion de

l'eau dépend fortement de nombreux facteurs différents, tels que les propriétés physiques et chimiques des constituants, les dimensions de la structure, la température ambiante, etc. Par conséquent, il est nécessaire d'étudier le comportement de diffusion de l'eau à long terme et son impact sur les propriétés mécaniques des structures sandwich à âme de balsa.

L'objectif de cette étude est de caractériser le comportement en vieillissement hygroscopique de structures sandwichs à âme de balsa avec des peaux en Polymère Renforcé de Fibres de Verre (PRFV). Des tests d'immersion dans l'eau ont été réalisés sur des éprouvettes de sandwich PRFV-balsa à l'aide d'un suivi par la méthode d'émission acoustique (EA). Une modélisation numérique dans ABAQUS a été réalisée pour prédire la localisation de la teneur en eau dans l'âme de balsa et dans les peaux de PRFV de la structure sandwich, respectivement, à l'aide du modèle Dual-Fick [4-5].

2. Méthodes expérimentales et numériques

2.1 Matériaux et échantillons

Afin d'étudier l'effet de l'humidité sur le comportement en flexion du sandwich à âme de bois de balsa dans des conditions de vieillissement à long terme [1], des échantillons de sandwich à âme de balsa (BALTEK SB.100, avec une densité de 148 kg/m^3) et des peaux composites stratifiées en Polymère Renforcé de Fibres de Verre (PRFV) ont été fabriqués, avec une forme spéciale en triple dog-bone, voir Fig. 1. Toutes les peaux en PRFV ont été fabriquées à partir de trois plis de tissu équilibré et d'époxy (Ref : Sicomin E 3190, sergé en fibre de verre de grammage 190 g/m^2 , avec 50 % de fraction volumique de fibre). La stratification de tous les échantillons de sandwich a été réalisée par infusion de résine [2-3]. Les dimensions de l'échantillon sont les suivantes : longueur 280 mm, largeur maximale 70 mm, largeur minimale 40 mm. L'épaisseur moyenne du balsa est de 9 mm, tandis que celle de chaque peau en PRFV est de 0,5 mm.

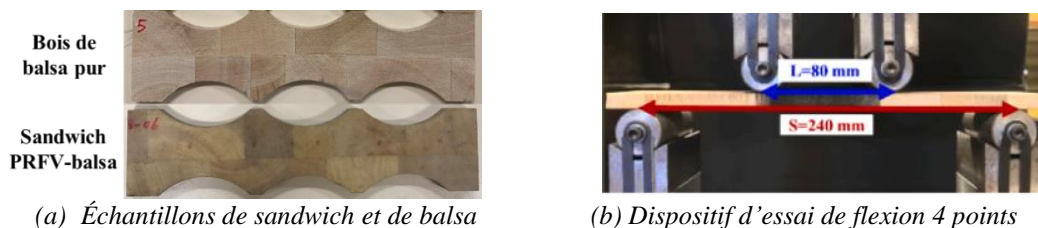


Fig. 1. Échantillons de sandwich à âme de balsa avec des peaux composites stratifiées en PRFV.

2.2 Essais de diffusion de l'eau contrôlés par émission acoustique

Les propriétés de sorption hygroscopique des échantillons de sandwichs PRFV-balsa ont été contrôlées [2] conformément à la norme ISO 12571. Cinq échantillons de sandwichs PRFV-balsa ont été initialement séchés dans une chambre climatique à $40 \text{ }^\circ\text{C}$, puis immergés dans de l'eau distillée à température ambiante jusqu'à l'obtention de l'équilibre. Le point de saturation a été atteint lorsque le changement de masse entre trois mesures consécutives a varié de moins de 0,1 % de la masse totale. Pendant la mesure, la variation de masse a été quantifiée à des intervalles de 24 heures. Enfin, la teneur en eau globale $c(t)$ de chaque échantillon, qui est le rapport entre la masse de l'eau absorbée et la masse initiale séchée, peut être calculée par la formule ci-dessous :

$$c(t) = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times 100 \% \quad (\text{Eq. 1})$$

où m_w est la masse de l'échantillon à l'instant t , m_d est la masse initiale séchée. Lorsque la masse se stabilise, la teneur en eau globale calculée est la teneur à saturation, ou encore capacité maximale d'absorption d'humidité, c_s .

Dans le cadre de ce protocole d'essai, une approche spéciale introduisant le test EA Hsu-Nielsen [3], également appelé test de rupture de la mine du crayon (voir Fig. 2), a été proposée afin de contrôler la vitesse de l'onde d'émission acoustique en fonction de la teneur en eau dans la structure sandwich. Deux capteurs EA et la source de la mine du crayon ont été disposés dans le sens de la longueur de l'échantillon, qui est dans la direction du module d'élasticité longitudinal de la peau en PRFV. Puis la vitesse v de l'onde d'EA est calculée telle que :

$$v = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (\text{Eq. 2})$$

avec la distance entre les deux capteurs Δd et la différence de temps d'arrivée de l'onde entre les deux capteurs Δt .

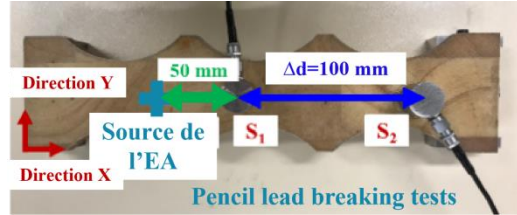


Fig. 2. Test EA Hsu-Nielsen de contrôle des effets de l'humidité sur les structures sandwichs PRFV-balsa.

2.3 Modèle de diffusion de l'eau dans les composites biosourcés

Le modèle de diffusion de Fick est le modèle le plus couramment utilisé pour prédire la diffusion de l'eau au sein d'une matrice polymère [1, 4], voir Eq. 3 :

$$c(t) = \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-D \left(\frac{2n+1}{e}\right)^2 \pi^2 t\right) \right] \times c_S \quad (\text{Eq. 3})$$

où $c(t)$ est la teneur en eau globale au temps t . D et c_S sont le coefficient de diffusion de l'eau et la teneur à saturation. e correspond à la distance dans le sens de la diffusion, représentant généralement l'épaisseur, pour les échantillons dont l'épaisseur est beaucoup plus faible que les autres dimensions. C'est pourquoi, dans ce travail, la diffusion de l'eau dans l'épaisseur est préférentiellement prise en compte.

Cependant, généralement, la théorie de Fick n'est pas satisfaisante pour décrire le comportement réel de la diffusion [4] dans les matériaux étudiés, par exemple au lessivage de constituants hydrosolubles se produit au cours du processus de diffusion de l'eau. Dans ces cas, le modèle de Dual-Fick [4-5] est souvent utilisé pour élucider le processus de diffusion de l'eau en deux phases Fickiennes (voir Fig. 3) :

$$\begin{aligned} c(t) &= c_I(t) + c_{II}(t) \\ &= \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-D_I \left(\frac{2n+1}{e}\right)^2 \pi^2 t\right) \right] \times c_{SI} + \\ &\quad \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-D_{II} \left(\frac{2n+1}{e}\right)^2 \pi^2 t\right) \right] \times c_{SII} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4})$$

où $c(t)$ est la teneur en eau globale au temps t . $c_I(t)$ et $c_{II}(t)$ sont la teneur en eau globale au moment t dans les phases I et II, respectivement. D_I et c_{SI} représentent le coefficient de diffusion de l'eau et la teneur à saturation dans la phase I. D_{II} et c_{SII} représentent le coefficient de diffusion et la teneur à saturation dans la phase II. e correspond à l'épaisseur de la structure.

Par conséquent, les cinq paramètres, y compris D_I , D_{II} , c_{SI} , c_{SII} et e , déterminent principalement la teneur en eau et la capacité maximale d'absorption d'humidité dans le modèle de Dual-Fick.

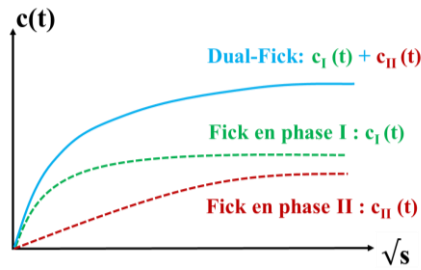


Fig. 3. Modèle de Dual-Fick : $c(t) = c_I(t) + c_{II}(t)$ [4-5].

3. Résultats et discussions

3.1 Résultats expérimentaux

Tout d'abord, la vitesse moyenne de l'onde d'EA des cinq échantillons est tracée sur la base de la mesure tous les 20 % de teneur en eau (voir Fig. 4. (a)). La vitesse de l'onde diminue de 3120 m/s à 1870 m/s (de 40 %) lorsque la teneur en eau augmente jusqu'à 120 %. Une formule empirique expliquant la corrélation entre la vitesse de l'onde d'EA et la teneur en eau peut alors être élucidée, pour prédire la vitesse dans des conditions de vieillissement à long terme, voir Eq. 5 :

$$v = 444.02 \cdot c^2 + 1609.2 \cdot c + 3120 \quad (\text{Eq. 5})$$

avec la vitesse de l'onde d'EA v et la teneur en eau c .

D'après la Fig. 4. (a), un point de transition S à 80 % de teneur en eau, avant lequel la réduction de la vitesse de l'onde est plus rapide, a été identifié. Par conséquent, deux conditions différentes (50 % et 120 %) de teneur en eau avant et après le point S ont été comparées pour étudier l'effet de l'humidité sur les propriétés en flexion des structures sandwichs PRFV-balsa. La Fig. 4. (b) montre les courbes de force-déplacement des échantillons soumis à l'essai en flexion 4 points, à l'état sec, à 50 % et à 120 % de teneur en eau. Ensuite, le Tab. 1 présente les valeurs mesurées de la vitesse de l'onde d'EA, de la rigidité en flexion et de la force maximale dans chaque condition de teneur en eau, et calcule également leurs valeurs normalisées pour faciliter la comparaison [2] dans la Fig. 4. (c).

La principale conclusion est que la rigidité en flexion diminue plus rapidement dans la phase initiale avant le point à 80 % de teneur en eau, tandis que la résistance diminue plus vite au cours de la période d'absorption ultérieure. Il a été démontré que la vitesse de l'onde d'EA dans un sandwich est principalement affectée [3] par le module d'élasticité de la peau composite, la densité et le coefficient de Poisson des matériaux. La vitesse de l'onde peut donc être utilisée pour prédire la dégradation de la rigidité de la structure sandwich due à l'absorption de l'eau [2].

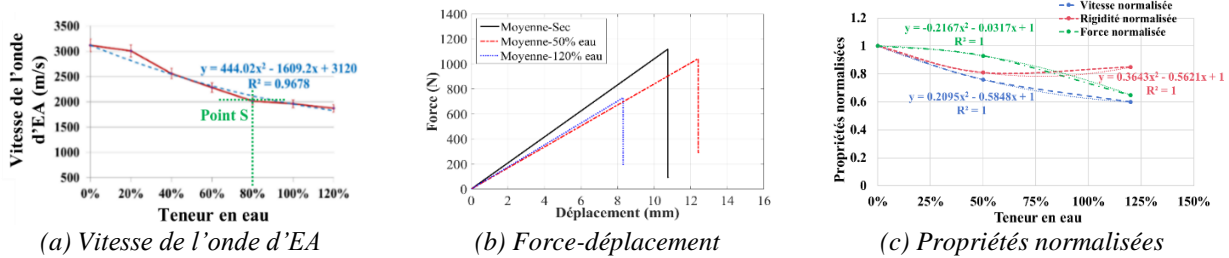


Fig. 4. Corrélations entre la teneur en eau, la vitesse de l'onde d'EA et les propriétés mécaniques du sandwich.

Teneur en eau	Vitesse de l'onde d'EA (m/s)	Vitesse normalisée	Rigidité en flexion (N/mm)	Rigidité normalisée	Force max (N)	Force normalisée
0	3120	1	104	1	1118	1
50 %	2382	0,76	84	0,81	1042	0,93
120 %	1870	0,60	88	0,85	730	0,65

Tab. 1. Dégradation des propriétés acoustiques et mécaniques due au vieillissement hygroscopique.

3.2 Localisation de la teneur en eau par modélisation

Dans ce travail, le modèle de Dual-Fick a été réalisé dans ABAQUS [5] par la somme théorique de la teneur en eau dans les deux phases séparées I et II (voir Fig. 5). Les quatre coefficients prédominants dans le sens de l'épaisseur dans les deux phases I et II du modèle Dual-Fick ont été obtenus par calcul analytique :

$$D_I = 1.44 \times 10^{-5} \text{ mm}^2\text{s}^{-1}, c_{SI} = 53 \% ; D_{II} = 1.34 \times 10^{-6} \text{ mm}^2\text{s}^{-1}, c_{SII} = 82 \%.$$

Au cours de la phase I, la teneur en eau atteint la saturation de 53 % dans tous les éléments de la peau en PRFV et de l'âme en balsa après 70 jours (voir Fig. 6). En revanche, la teneur en eau dans la peau atteint la valeur de saturation de 82 % après seulement 20 jours dans la deuxième phase II, tandis que la teneur en eau dans l'âme augmente très lentement sans atteindre la saturation finale. Cela pourrait correspondre au mécanisme suivant de reprise en eau au sein de sandwich PRFV-balsa pendant le processus de vieillissement hygroscopique à long terme :

Phase I : la peau en PRFV atteint la saturation à 80 % de la teneur en eau globale après environ 20 jours d'absorption, puis l'eau commence à pénétrer dans l'âme de balsa plus rapidement après 80 %. Cela peut aider à expliquer pourquoi la rigidité diminue plus rapidement à une teneur en eau de 50 % sur la Fig. 4. (c), parce que la rigidité du sandwich est principalement déterminée par le module de la peau [3], que l'on peut également relier à la vitesse de l'onde d'EA (voir Tab. 2).

Phase II : c'est la résine de la peau et de l'âme qui affecte principalement le taux d'absorption de l'eau dans le sandwich, en raison d'un coefficient de diffusion plus faible à $10^{-6} \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$. Il faut plus de temps à la résine pour atteindre la saturation en eau, en particulier au cours de la phase ultérieure [1]. Par conséquent, la résistance de la structure sandwich diminue plus rapidement (voir Fig. 4. (c)) au-delà d'une teneur en eau de 50 % en raison de l'initiation de phénomènes d'endommagement microscopiques dans la résine.

Finalement, la localisation de la teneur en eau (voir Fig. 6) dans la peau et l'âme du sandwich PRFV-balsa en fonction du temps peut ainsi être prédite sur la base du calcul de la vitesse de l'onde d'EA (voir Tab. 2) et d'une modélisation via Dual-Fick.

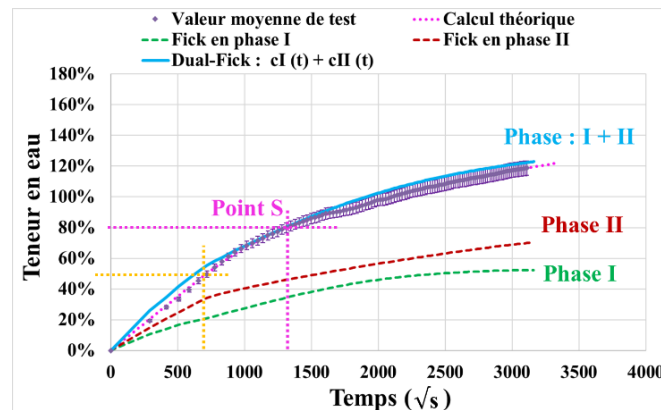


Fig. 5. Absorption de la teneur en eau globale dans un sandwich PRFV-balsa basée sur le modèle Dual-Fick.

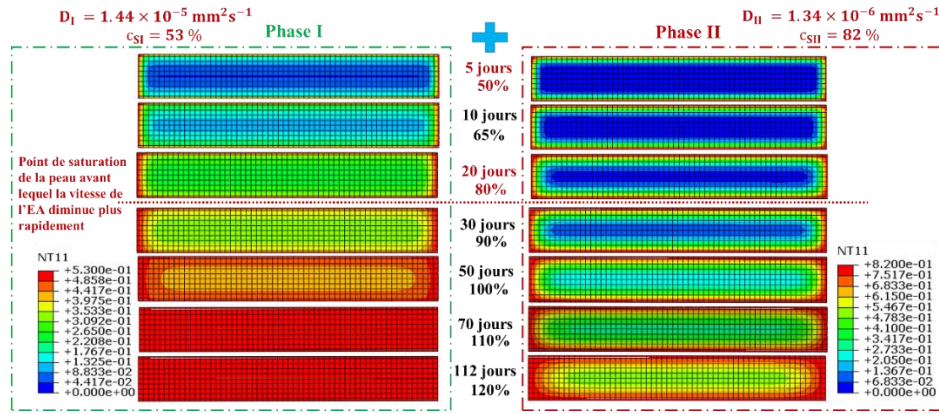


Fig. 6. Localisation de la teneur en eau locale dans la peau et l'âme d'un sandwich en balsa

Teneur en eau	50 %	65 %	80 %	90 %	100 %	110 %	120 %
Jours	4-5	10-11	20-21	30-31	50-51	70-72	102-112
Vitesse de l'onde d'EA normalisée	0,76	0,73	0,68	0,65	0,63	0,61	0,60

Tab. 2. Méthode de prédiction de la localisation de la teneur en eau basée sur la vitesse de l'onde d'EA (Eq. 5).

4. Conclusions

Basé sur les relations entre la teneur en eau, la vitesse de l'onde d'EA et la rigidité du sandwich PRFV-balsa, une nouvelle méthodologie a été proposée, qui vise à prédire la dégradation de la rigidité en fonction de la teneur en eau dans des conditions de vieillissement à long terme, ainsi que la localisation de la teneur en eau dans la peau fine et l'âme épaisse due au temps, à l'aide d'une modélisation numérique basée sur la loi de Dual-Fick. Cependant, d'autres tests doivent être ajoutés pour valider les conclusions de ce travail, par exemple, d'autres échantillons de sandwichs humides ayant une teneur en eau globale différente, telles que 80 % et 100 %, pourraient être testés.

De plus, afin de connaître la teneur en eau locale de la peau et de l'âme séparément, il est nécessaire de vérifier les calculs du modèle Dual-Fick par une exploration approfondie des caractéristiques de l'onde EA, qui permet de mesurer le degré de la dégradation de la rigidité induite par l'absorption d'eau dans les différents constituants. Cela permet également d'identifier le rôle des matériaux de la peau et de l'âme à différents moments du processus de vieillissement.

Remerciements

Les auteurs remercient le projet ADEME PERFECTO porté par la société Outre Loire, pour leur soutien à ce travail visant à développer un catamaran à foils en matériaux composites biosourcés.

Références

- [1] A.A. Bachchan, P.P. Das, V. Chaudhary « Effect of moisture absorption on the properties of natural fiber reinforced polymer composites: A review », Materials Today: Proceedings Vol. 49, pp. 3403-3408, 2022.
- [2] Y. Wu, M. L. Pastor, M. Perrin, P. Casari, X. Gong « A new methodology to predict moisture effects on mechanical behaviors of GFRP-balsa sandwich by acoustic emission and infrared thermography », Composite Structures Vol. 287, pp. 115342, 2022.
- [3] Y. Wu, M. Perrin, M. L. Pastor, P. Casari, X. Gong « On the determination of acoustic emission wave propagation velocity in composite sandwich structures », Composite Structures Vol. 259, pp. 113231, 2021.
- [4] A. Mubashar, I. A. Ashcroft, G. W. Critchlow, A.D. Crocombe « Modelling cyclic moisture uptake in an epoxy adhesive », The Journal of Adhesion Vol. 85 n° 10, pp. 711-735, 2009.
- [5] Y. Wu, J. Fajoui, P. Casari, S. Fréour, et al, « Modeling and experimental analysis of moisture diffusion behavior in bio-based balsa wood core composite sandwich », in : ECCM21–21st European Conference on Composite Materials. European Society for Composite Materials (ESCM), Nantes Université, France, pp. 115, 2024.