



HAL
open science

Caractérisation ultrasonore du vieillissement de matériaux composites représentatifs de pales d'éolienne offshore

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

► To cite this version:

Khalid Aoujdad, El Hadji Amadou Ba, Pierre Maréchal, Damien Leduc, Mounsif Ech-Cherif El-Kettani, et al.. Caractérisation ultrasonore du vieillissement de matériaux composites représentatifs de pales d'éolienne offshore. JNC23: Journées Nationales sur les Composites 2023, AMAC, UFC, Supmicrotech-ENSMM, CNRS, Jul 2023, Besançon, France. hal-04606965

HAL Id: hal-04606965

<https://hal.science/hal-04606965>

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.

Caractérisation ultrasonore du vieillissement de matériaux composites représentatifs de pales d'éolienne offshore

Ultrasonic characterization of aging of representative composite materials of offshore wind turbine blades

Khalid AOUJDAD¹, El Hadji Amadou BA², Pierre MARECHAL¹, Damien LEDUC¹, Mounisif ECH-CHERIF EL-KETTANI¹, Florian GEHRING², Alexandre VIVET²

1 : LOMC

CNRS UMR 6294, Université Le Havre Normandie
25 Rue Philippe Lebon, 76600 Le Havre
e-mail : khalid.aoujdad@univ-lehavre.fr

2 : CIMAP

CNRS UMR 6252, Université de Caen Normandie
Esp. de la Paix, 14000 Caen
e-mail : elhadji-amadou.ba@etu.unicaen.fr

Résumé

Les conditions extrêmes (humidité, salinité, variations de température) auxquelles les pales des éoliennes offshore sont exposées entraînant des dommages et une détérioration des matériaux. L'idée de notre projet est d'appliquer les méthodes de Contrôle Non Destructif (CND) par ultrasons pour détecter et évaluer les dégradations structurales des pales d'éoliennes vieilles en milieu marin. Ce contrôle est non invasif, offre des résultats en temps réel et peut être utilisé de manière répétée pour surveiller les dégradations. Toutefois, une expertise et une interprétation précise des données sont nécessaires pour garantir l'intégrité des pales. Ce contrôle est essentiel pour évaluer les dégradations des pales vieilles, permettant des décisions éclairées pour prolonger la durée de vie des éoliennes offshore grâce à des inspections fiables. Notre étude propose des méthodes acoustiques ultrasonores non destructives pour évaluer le vieillissement des pales en milieu marin. Nous comparerons ces techniques aux méthodes mécaniques destructives. Deux laboratoires sont impliqués : le LOMC UMR 6294 CNRS pour le vieillissement et la caractérisation ultrasonore, et le CIMAP UMR 6252 CNRS pour la fabrication et les essais mécaniques.

Abstract

The extreme conditions (humidity, salinity, temperature variations) to which offshore wind turbine blades are exposed lead to damage and deterioration of the materials. The idea of our project is to apply ultrasonic Non-Destructive Testing (NDT) methods to detect and evaluate structural degradation of aged wind turbine blades in the marine environment. This control is non-invasive, offers real-time results and can be used repeatedly to monitor degradations. However, accurate expertise and interpretation of the data is required to ensure blade integrity. This monitoring is essential to assess the degradations of aged blades, enabling informed decisions to extend the life of offshore wind turbines through reliable inspections. Our study proposes non-destructive ultrasonic acoustic methods to assess blade aging in the marine environment. We will compare these techniques to destructive mechanical methods. Two laboratories are involved: the LOMC UMR 6294 CNRS for aging and ultrasonic characterization, and the CIMAP UMR 6252 CNRS for manufacturing and mechanical testing.

Mots Clés : Contrôle Non Destructif, Matériaux Composites, Vieillissement hydrique, Ultrasons, Energies Marines Renouvelables.

Keywords: Non-Destructive Testing, Composite Materials, Water Aging, Ultrasonics, Renewable Marine Energies.

1 Introduction

1.1 Contexte général

L'optimisation de la production de l'énergie éolienne offshore a conduit à des pales plus grandes pour améliorer l'efficacité énergétique. Les avantages incluent une production d'électricité accrue et une rentabilité améliorée. Cependant, cela engendre des défis techniques et logistiques tels que des structures de support plus solides et des systèmes de contrôle avancés. De plus, le transport, l'installation et la maintenance deviennent plus complexes et coûteux.

Le corps des pales est un composite sandwich : une peau stratifiée verre-polyester UD GFRP (Uni-Directional Glass Fiber Reinforced Polymer), et une âme en mousse PVC (PolyVinylChloride) à faible densité ($\rho = 80 \text{ kg/m}^3$). Ainsi, ce composite sandwich offre une masse volumique effective faible et une rigidité spécifique (C_{ij}/ρ) élevée. Notre étude se concentre sur l'analyse et la caractérisation du sandwich et de la peau selon différents niveaux de vieillissement, ainsi que sur l'interface âme-peau pour évaluer l'adhésion.

1.2 Vieillissement hydrique accéléré

Le processus de vieillissement accéléré sera utilisé pour simuler la dégradation structurelle des pales causée par l'environnement marin pendant leur cycle de vie. Cela sera réalisé en appliquant des températures élevées afin d'obtenir des résultats similaires aux dégradations observées in situ, mais sur une période réduite.

La cuve dédiée au vieillissement accéléré au sein du laboratoire est illustrée par la photographie en Fig. 1. Les échantillons sont immergés en suspension pour faciliter leur récupération, que ce soit pour les tester ou les peser afin de surveiller l'évolution de leur absorption d'eau.



Fig. 1. (a) Cuve d'immersion et (b) thermostat de régulation pour le vieillissement accéléré des échantillons.

L'observation de l'absorption d'eau des échantillons permet de comprendre le comportement du matériau face à l'humidité. La Fig. 2 illustre la rétention hydrique massique par un échantillon de plaque de composite tricouche GFRP-PVC-GFRP pendant les premiers jours de son immersion.

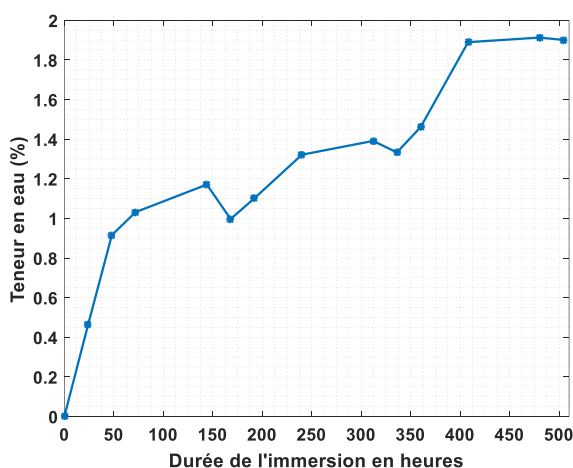


Fig. 2. Rétention hydrique d'un composite sandwich GFRP-PVC-GFRP.

La courbe illustrée en Fig. 2 montre une rétention hydrique légèrement inférieure à 2% de la masse initiale de l'échantillon après 500 heures d'immersion. Néanmoins, ce gain en masse va disparaître après quelques heures en dehors de la cuve, ce qui est justifié par la nature de la mousse à porosité fermé. La résistance de notre structure à l'humidité est confirmée par ce résultat, prouvant sa robustesse.

2 Structure sandwich

Le principal enjeu lié aux pales d'éoliennes consiste à trouver des matériaux solides et légers adaptés aux très grandes dimensions des pales. Ainsi, les composites sandwich offrent un compromis optimal, tel que peuvent le refléter des caractéristiques telles que la résistance mécanique spécifique et la rigidité spécifique. Des performances optimales peuvent être obtenues grâce à l'insertion d'une "âme" en mousse de faible densité (légèreté) entre des "peaux" en composite stratifié (rigidité). D'un point de vue applicatif, notre choix s'est porté vers une âme en mousse PVC entre deux peaux de GFRP, offrant un compromis coût/performance optimal (cf Fig. 3).

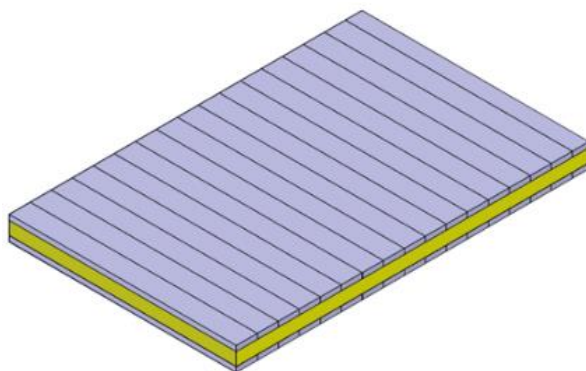


Fig. 3. Plaque en composite sandwich GFRP-PVC-GFRP

Sur la base des échanges avec les partenaires du projet, la première étape du choix des matériaux constitutifs du composite sandwich nous a conduits au dimensionnement de leurs épaisseurs. Ainsi, les propriétés effectives de la mousse PVC, de la résine polyester et des fibres de verre ont été données par les fournisseurs et vérifiées par au sein du laboratoire. Les résultats de ces caractérisations sont résumés dans le Tab. 1, avec les propriétés des matériaux composants le composite sandwich (mousse PVC et peau GFRP) et de l'assemblage résultant (GFRP-PVC-GFRP).

Propriété / Matériau	Mousse PVC	Peau GFRP	Résine	GFRP-PVC-GFRP
d [mm]	4.86	1.8	0.597	9,654
ρ [kg/m ³]	80	1600	1300	918
c_L [m/s]	650	2600	2000	1850
c_T [m/s]	300	1450	900	1200

Tab. 1. Propriétés des composants et de l'assemblage sandwich

3 Caractérisation ultrasonore

3.1 Evaluation non destructive (END) par ultrasons

Les méthodes ultrasonores englobent des aspects de contrôle non destructif (CND) et d'évaluation non destructive (END). Dans le premier cas, la propagation des ondes ultrasonores permet d'inspecter les pales en détectant les fissures, décollements et corrosion. Le CND permet une identification précise des dégradations, facilitant la prise de décision pour la maintenance, la réparation ou le remplacement des pales.

Dans le second cas, les méthodes d'END permettent de caractériser la dégradation structurelle des matériaux. Ainsi, l'évolution des vitesses longitudinale c_L et transversale c_T dans le matériau sont susceptibles de diminuer au cours du vieillissement [1]. La diminution des vitesses reflète directement l'évolution de la rigidité spécifique du matériau (Eq. 1).

$$\begin{cases} c_L = \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}} \\ c_T = \sqrt{\frac{C_{66}}{\rho}} \end{cases} \quad (\text{Eq. 1})$$

Les mesures d'atténuation ultrasonore permettent aussi de quantifier les dégradations, car plus un matériau se dégrade plus il devient diffusif et absorbant et limitant pour la propagation des ondes ultrasonores. Aussi, le vieillissement d'un matériau est mesurable *via* le suivi des vitesses (dont on s'attend à observer une diminution) et de l'atténuation (dont on s'attend à observer une augmentation). Afin de relever l'évolution de l'état des propriétés élastiques du composite sandwich, nous avons choisi de mettre en œuvre une méthode qui regroupe les deux précédentes (CND et END), avec le suivi du coefficient de transmission des ondes ultrasonores, dont on s'attend à ce qu'il diminue après des cycles de vieillissement.

3.2 Processus expérimental

Le dispositif expérimental, illustré sur la Fig. 4, représente une plaque de composite sandwich immergée entre deux transducteurs de fréquence centrale $f = 500$ kHz. Les transducteurs disposent de translations verticales permettant une insonation au centre de la plaque. Chacun des transducteurs dispose d'un réglage de rotation (déflexion horizontale et verticale) permettant l'ajustement de l'alignement des axes des transducteurs avec la normale à la plaque. Sur la base de ce réglage préliminaire (alignement des axes et centrage), la plaque est par la suite entraînée en rotation autour de son axe vertical, tandis que les signaux transmis sont relevés en fonction de l'angle d'incidence.

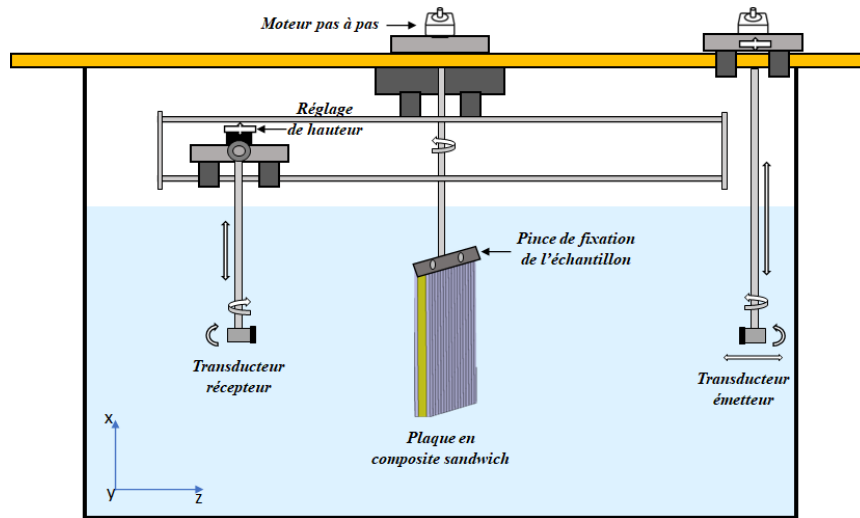


Fig. 4: Dispositif expérimental.

Sur la Fig. 5 sont représentés deux signaux, le premier est utilisé comme signal de référence (Fig. 5 (a)), transmis directement entre les deux transducteurs, et celui transmis à travers une plaque composite sandwich (Fig. 5 (b)) en incidence normale.

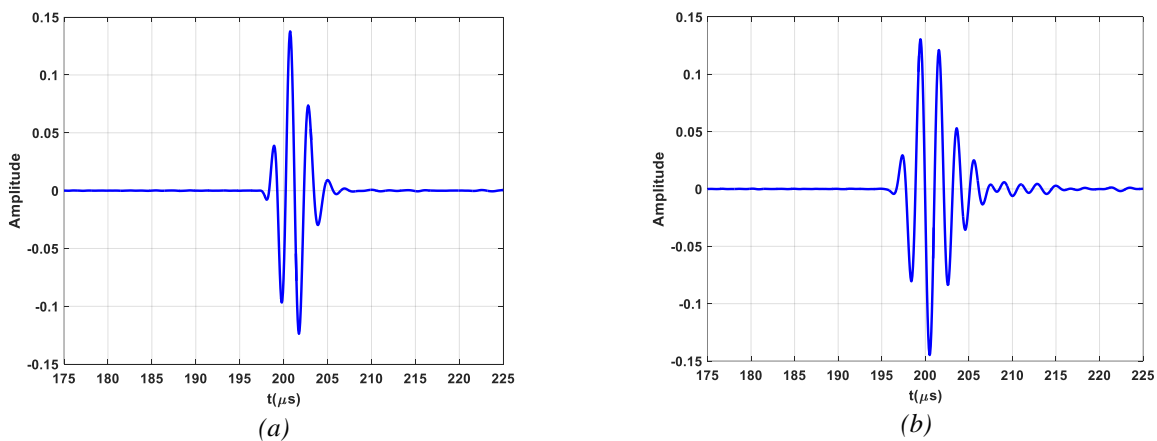


Fig. 5: Echos relevés en transmission directe : (a) dans l'eau seule ; (b) à travers la plaque en immersion.

La Fig. 6 illustre le spectre du signal de référence (Fig. 6 (a)), et les spectres des signaux transmis (Fig. 6 (b)) à travers la plaque en incidence normale et à des angles d'incidence $\theta = 10^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $\theta = 22^\circ$ et $\theta = 30^\circ$. Ces spectres sont par la suite utilisés pour déterminer le coefficient de transmission $T(f, \theta)$ à travers la plaque, *via* le calcul du rapport entre le spectre du signal représentant la réponse de la plaque $S_t(f, \theta)$ et celui de référence $S_{ref}(f)$ (Eq. 2).

$$T(f, \theta) = \frac{S_t(f, \theta)}{S_{ref}(f)} \quad (\text{Eq. 2})$$

L'écart considérable entre les gains des deux acquisitions est justifié par le changement des réglages expérimentaux imposés par la nature absorbante de nos échantillons.

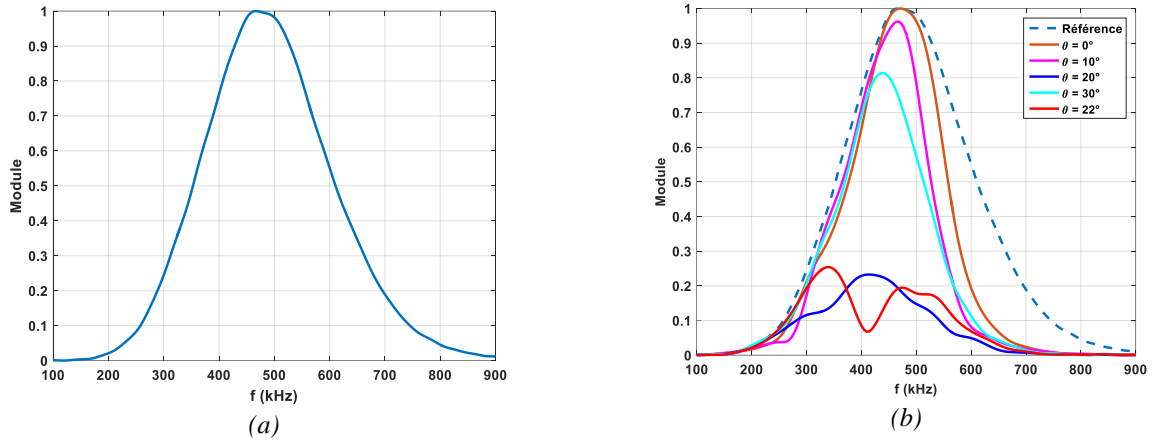


Fig. 6: Spectres relevés en transmission directe : (a) dans l'eau seule ; (b) à travers la plaque en immersion.

La bande passante à -12 dB du système d'émission-réception peut être évaluée qualitativement de 300 à 660 kHz. Dès lors que la plaque composite tricouche est insérée, l'atténuation intrinsèque des matériaux constitutifs réduit cette bande passante à -12 dB de 320 à 580 kHz. Le décalage remarquable entre les pics des spectres de chaque angle illustre la différence de la réponse de la plaque en fonction de l'angle d'incidence. Entre les angles $\theta = 20^\circ$ et $\theta = 22^\circ$, une diminution très marquée de l'amplitude relative du signal transmis est observée. Du fait du passage d'un angle critique de notre structure, l'onde longitudinale n'est plus transmise, laissant place à la seule contribution transversale dans la plaque étudiée. La détermination de l'angle critique d'une structure multicouche constituée de n couches, impose d'écrire la loi de Snell-Descartes à chaque interface (Eq. 3). Ainsi, dans le cas de couches fluides (composantes longitudinales seules), la condition de réfraction aux interfaces donne :

$$\frac{\sin(\theta_k)}{C_{L,k}} = cste \quad (\text{Eq. 3})$$

Toutefois, dans le cas présent, il est nécessaire de noter que le calcul du premier angle critique pour une structure tricouche constituée de couches anisotropes doit faire l'objet d'une approche plus détaillée, au terme de laquelle on obtient :

$$\begin{cases} \theta_{L1,c} = \sin^{-1}\left(\frac{C_{eau}}{C_{L1}}\right) = 33.89^\circ \\ \theta_{L2,c} = \sin^{-1}\left(\frac{C_{L1}}{C_{L2}}\right) = 18.96^\circ \end{cases} \quad (\text{Eq. 4})$$

3.3 Coefficient de transmission de la plaque sandwich

Pour calculer le coefficient de transmission, plusieurs méthodes sont disponibles, notamment l'utilisation des notations de Fresnel. Ainsi, l'écriture des coefficients de réflexion et de transmission selon les notations de Fresnel et basée sur la décomposition en série de Debye, permet d'obtenir une formulation numérique inconditionnellement stable en incidence normale, dite DSM (Debye Series Method) [2] [3]. L'extension de cette approche a été développée en incidence oblique par Rokhlin & Wang [4] [5] sous la formulation d'une méthode matricielle récursive inconditionnellement stable, dite SMM (Stiffness Matrix Method). Ces deux méthodes ont été adaptées pour notre étude de cas de transmission ultrasonore à travers des plaques tricouches immergées. Ainsi, le coefficient de transmission, noté $T(f, \theta)$, est évalué en fonction de la fréquence f et de l'angle θ° d'incidence. Le coefficient de transmission résulte du rapport entre le signal transmis $S_t(f, \theta)$ Fig. 6 (b) à travers la plaque tricouche et celui de référence sans plaque en incidence normale $S_{ref}(f)$ Fig. 6 (a) :

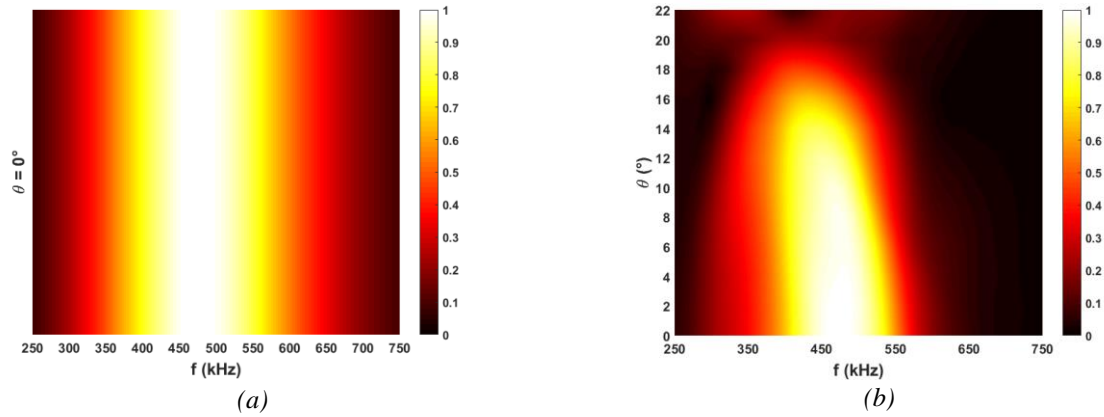


Fig. 7 : Matrices des spectres relevés en transmission directe : (a) dans l'eau seule ; (b) à travers la plaque en immersion

Il faut veiller à ce que le rapport calculé ne prenne en compte que la partie du signal utile, pour éviter les erreurs de calcul lors de la division par des valeurs très petites par rapport au numérateur. Une simple analyse spectrale et étude de la bande passante des transducteurs peut aider à définir cette zone de calcul [6].

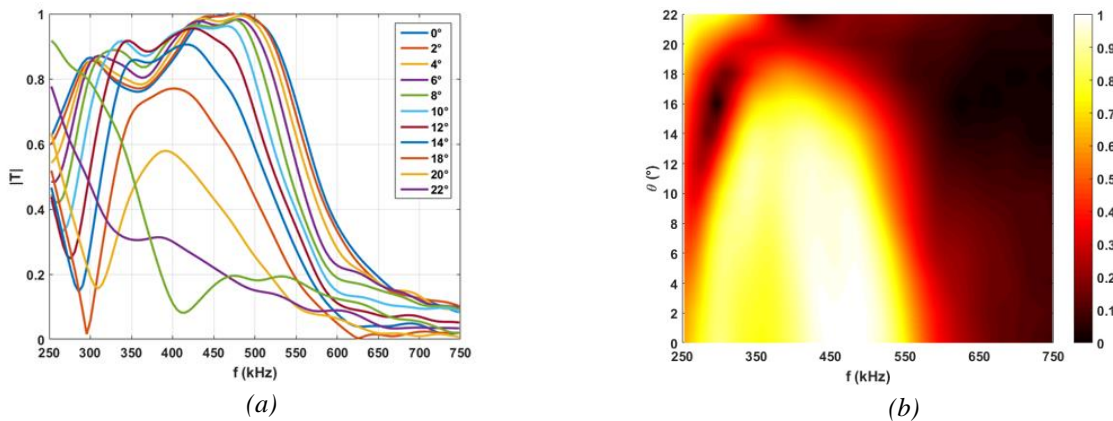


Figure 8 : Module du coefficient de transmission expérimental en fonction des angles en courbes (a) et en cartographie (b)

L'introduction des propriétés des couches dans les scripts numériques cités avant, et l'ajustement des pertes permettent d'avoir un résultat numérique proche de l'expérimental (cf Fig. 9) :

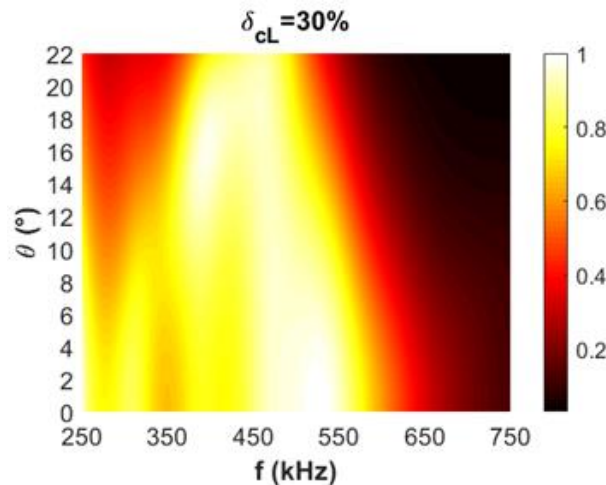


Fig. 9. Coefficient de transmission numérique d'une plaque tricouche.

Conclusion

Ces premiers résultats montrent la capacité des ondes ultrasonores à inspecter les assemblages sandwich à base de fibres de verre et de résine polyester, notamment par l'intermédiaire du coefficient de transmission. Des travaux sont en cours pour améliorer le modèle numérique et caractériser les assemblages vieillissés. L'objectif sera de quantifier le vieillissement au moyen de ces indicateurs ultrasonores et de les comparer à des indicateurs obtenus par des essais mécaniques destructifs.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche et le LabEx EMC3 pour son soutien financier dans le cadre du projet COSPHI (Réseau d'Intérêt Normand, subvention n° 10-LABX-0009), ainsi que la région Normandie.

Références

- [1] Y. Gélébart, « Évaluation non destructive par ultrasons du vieillissement thermique d'une structure composite », These de doctorat, Le Havre, 2007. Consulté le: 30 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2007LEHA0002>
- [2] O. Lenoir et P. Maréchal, « Study of plane periodic multilayered viscoelastic media: Experiment and simulation », in *2009 IEEE International Ultrasonics Symposium*, sept. 2009, p. 1028-1031. doi: 10.1109/ULTSYM.2009.5441518.
- [3] P. Maréchal, O. Lenoir, A. Khaled, M. Ech Cherif El Kettani, et D. Chenouni, « Viscoelasticity Effect on a Periodic Plane Medium Immersed in Water », *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 100, n° 6, p. 1036-1043, nov. 2014, doi: 10.3813/AAA.918783.
- [4] L. Wang et S. I. Rokhlin, « Stable reformulation of transfer matrix method for wave propagation in layered anisotropic media », *Ultrasonics*, vol. 39, n° 6, p. 413-424, oct. 2001, doi: 10.1016/S0041-624X(01)00082-8.
- [5] S. I. Rokhlin et L. Wang, « Stable recursive algorithm for elastic wave propagation in layered anisotropic media: Stiffness matrix method », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 112, n° 3, p. 822-834, sept. 2002, doi: 10.1121/1.1497365.
- [6] D. Soubsoil, « Diffusion acoustique vers l'avant d'objets élastiques immergés dans l'eau », These de doctorat, Normandie, 2018. Consulté le: 15 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2018NORMLH17>