

CFA/VISHNO 2016

Localisation et dimensionnement de défauts de répartition de torons de fibres de carbone par transducteur multi-éléments

N. Ghodhbani, P. Maréchal et H. Duflo

Université du Havre, LOMC UMR 6294 CNRS, 75 rue Bellot, 76058 Le Havre, France
nacef.ghodhbani@yahoo.fr



LE MANS

Le suivi ultrasonore de propriétés durant la fabrication de matériaux composites permet d'effectuer un contrôle santé de pièces composites en cours de fabrication. Ce thème de recherche se situe dans le contexte du suivi en temps réel des propriétés, tant au niveau de la détection de défauts qu'au niveau de la qualité du produit fini. Un dispositif expérimental a été mis au point, visant à contrôler un pli de fibres de carbonés, avec des défauts intégrés, à l'intérieur d'un moule en aluminium. Un transducteur multiélément linéaire haute résolution est utilisé pour obtenir une résolution optimale. Une première approche consiste à suivre le déplacement des fibres avec des C-scan en deux dimensions (x, y). Une deuxième approche a été proposée, avec des C-scan en profondeur (x, y, z), afin de localiser les défauts internes et de visualiser le profil des plis. Enfin, une cartographie de plaque composite permet d'obtenir un C-scan des propriétés ultrasonores: vitesse et atténuation.

1 Introduction

La caractérisation ultrasonore de matériaux composites permet d'en identifier les propriétés élastiques et leur dépendance à de multiples facteurs environnementaux. En particulier, des inhomogénéités de matière peuvent induire des inhomogénéités de propriétés et conduire à un vieillissement localisé accéléré, du fait des sollicitations telles que : pression, fatigue, température, taux d'humidité... L'évaluation non-destructive (END) en cours d'élaboration permet d'envisager de nouvelles voies d'amélioration du procédé de fabrication [1]. Le suivi en temps réel des conditions de fabrication, de la répartition de matière et des propriétés viscoélastiques du matériau composite, sont autant d'éléments d'amélioration.

Ainsi, la caractérisation ultrasonore en fonction de la position (x, y) et du temps de vol τ permettent d'évaluer l'uniformité et la répartition spatiale des propriétés viscoélastiques effectives [2]. Ensuite, l'évaluation de ces paramètres viscoélastiques en fonction de différentes dates d'acquisition t_{acq} permet d'effectuer un suivi de l'évolution de ces propriétés [3], que ce soit en cours de fabrication, de traitement, ou de vie du matériau [4]. Ainsi, avec les systèmes d'émission-réception multiéléments et de balayage mécanique, les propriétés ultrasonores sont cartographiées en deux dimensions. Un découpage de la fenêtre d'exploration selon le temps de vol permet de localiser plus précisément le défaut de fibre ou de matière selon le cas.

2 Modélisation

La propagation ultrasonore dans un empilement de milieux homogènes, entraîne l'apparition d'échos aux interfaces présentant un coefficient de réflexion $|R_{pq}| > 0$ et une dimension significative relativement à la longueur d'onde $D/\lambda > 1$ [5]. Dans le cas de milieux complexes tels que les matériaux composites fibreux, ces critères entrent en considération à différentes échelles : les fibres constituant un toron, les torons tissés constituant un pli, les plis orientés et superposés constituant le renfort, la résine époxy injectée constituant la matrice. Les réflexions sont donc multiples et des hypothèses simplificatrices conduisent à des propriétés effectives à différentes échelles : épaisseur totale, épaisseur d'un pli, ou encore distinction du tissage dans un pli.

Dans une première approche, les propriétés effectives d'un matériau composite selon son épaisseur sont évaluées via l'identification du nombre d'ondes longitudinales $k_L(f) = \omega/c_L(f) + j \cdot \alpha_L(f)$, avec f la fréquence, $c_L(f)$ la vitesse longitudinale, et $\alpha_L(f)$ l'atténuation longitudinale.

Afin d'identifier ces propriétés, la connaissance de la nature des matériaux environnants est nécessaire. Ceux-ci sont donc caractérisés de façon préalable afin de pouvoir les prendre en considération. Les propriétés de la couche

étudiée peuvent alors être déterminées par un problème inverse [6, 7]. Dans la configuration tricouche étudiée, contre-moule/composite/moule, le matériau composite est simulé par un pli de fibres en immersion dans l'eau à une température connue. Soient $s_1(t)$ et $s_2(t)$ les signaux réfléchis respectivement au premier et au deuxième aller-retour dans le milieu intermédiaire. Les spectres associés à ces échos sont notés respectivement $\underline{S}_1(f)$ et $\underline{S}_2(f)$ [8] :

$$\underline{S}_n(f) = A \cdot e^{jk_L(f)2nd_2} \cdot \underline{T}_{12} \cdot \underline{R}_{23} \cdot (\underline{R}_{21} \cdot \underline{R}_{23})^{n-1} \cdot \underline{T}_{21} \quad (1)$$

où A est l'amplitude du signal émis, d_2 est l'épaisseur du milieu intermédiaire, \underline{T}_{pq} et \underline{R}_{pq} sont respectivement les coefficients de transmission et de réflexion lorsque le faisceau ultrasonore est incident du milieu d'indice p vers le milieu d'indice q . La fonction de transfert entre les spectres $\underline{S}_2(f)$ et $\underline{S}_1(f)$ est donnée par :

$$\underline{T}(f) = \frac{\underline{S}_2(f)}{\underline{S}_1(f)} = e^{-j2\pi f \frac{2d_2}{c_L}} \cdot e^{-2d_2 \cdot \alpha_L} \cdot \underline{R}_{21} \cdot \underline{R}_{23} \quad (2)$$

Les coefficients de transmission \underline{T}_{pq} et de réflexion \underline{R}_{pq} sont estimés via les propriétés des matériaux constituant la structure à étudier. Ainsi, les propriétés des éléments constituants (Tableau 1) ont été caractérisées dans des conditions similaires ou relevées dans la littérature (fibres de carbone). Ainsi au cours de la polymérisation, la résine époxy liquide (l) imprègne le tissu de fibres de carbone puis se solidifie en un composite époxy (s)/fibres de carbone.

TABLEAU 1 – Propriétés acoustiques des matériaux étudiés.

Matériau	ρ (kg/m ³)	c_L (m/s)	Z (MRa)
Alu	2700	6375	17,2
Epoxy (l)	1000	1645	1,64
Epoxy (s)	1000	2730	2,73
Fibres carbone	1900	9000	17,1
Eau	1000	1480	1,48

ρ : masse volumique (kg/m³); c_L : vitesse longitudinale (m/s) ; Z : impédance acoustique (MRa).

Comme l'illustre la Figure 1, les propriétés effectives du matériau composite peuvent être déduites par des modèles d'homogénéisation [9]. Les propriétés finalement obtenues résultent d'une combinaison de celles des constituants faisant état de matériaux composites orthotropes [4]. Cependant, seules les propriétés effectives selon l'épaisseur seront évaluées expérimentalement. Ainsi, des travaux antérieurs [2, 10] ont permis d'évaluer $\rho = 1486$ kg/m³) et $c_L = 2900$ m/s pour une fraction volumique de fibre $V_f = 54\%$. Ces valeurs constituent un point de référence.

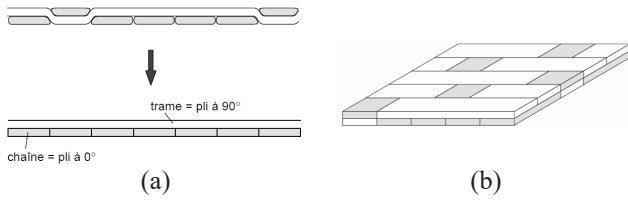


FIGURE 1 – Modélisation d'un satin 5 (a) par un stratifié (0°/90°) ; (b) par une mosaïque de plis asymétriques (0°/90° et (90°/0°). Selon Dal Maso et Meziere [9].

3 Dispositif expérimental

3.1 Configuration

Le dispositif expérimental est constitué d'un échantillon en immersion et d'un transducteur multiéléments, en translation l'un par rapport à l'autre. Les signaux résultants d'un tel balayage électronique et mécanique permettent d'effectuer une évaluation des propriétés en fonction de la position (x, y) , associée à un temps de vol τ , traduit en une profondeur $z = c_L \cdot \tau/2$, d'une date d'acquisition t_{acq} qui peut à son tour être traduite en position en lien avec la vitesse de balayage mécanique v_{bm} . En particulier, dans le cas d'un balayage mécanique selon y , de direction orthogonale à la direction du balayage électronique x , et à la profondeur d'exploration z , la position y est donnée par : $y_{acq} = v_{bm} \cdot T_{acq}$. Cette période d'acquisition $T_{acq} = 1/f_{acq}$ est limitée par la profondeur d'exploration et par les possibilités de numérisation du système d'émission-réception. Enfin, viennent les incontournables critères d'échantillonnage dont la maîtrise permet de réduire le pas d'échantillonnage au strict nécessaire, et de limiter la taille du fichier résultant d'une acquisition.

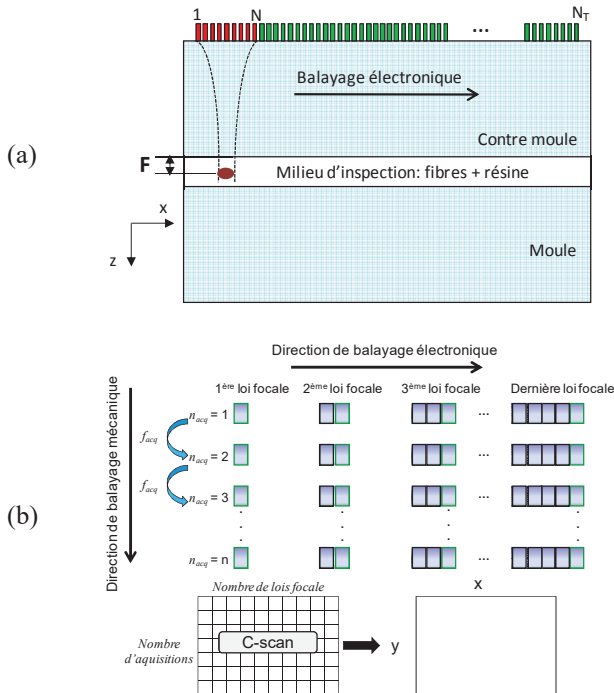


FIGURE 2 – Configuration expérimentale : (a) Balayage électronique par transducteur multiéléments ; (b) Balayage mécanique par un module de translation micrométrique.

La fonction de directivité angulaire $DA(\theta_x, \theta_y)$ est fonction des angles directeurs θ_x et θ_y , selon x et y , et permet d'évaluer les résolutions angulaires à -3dB [1, 11] :

$$DA(\theta_x, \theta_y) = \left| \text{sinc} \left(\frac{kX\theta_x}{2} \right) \cdot \text{sinc} \left(\frac{kY\theta_y}{2} \right) \right| \quad (3)$$

où k est le nombre d'onde, X et Y sont les ouvertures effectives, X résultant des N éléments actifs d'une loi focale et Y étant la longueur de l'élément actif. Ainsi, les résolutions latérales Δx et Δy selon x et y sont estimées par :

$$\begin{cases} \Delta x = 0,886 \cdot \lambda F / X \approx 8,44 \cdot 10^{-3} \cdot F \\ \Delta y = 0,886 \cdot \lambda F / Y \approx 19,0 \cdot 10^{-3} \cdot F \end{cases} \quad (4)$$

où $\lambda = 2\pi/k = 150 \mu\text{m}$ est la longueur d'onde, $X = (N - 1) \cdot p + a$ et $Y = b$ sont respectivement les ouvertures selon x et y , $a = 0,25 \text{ mm}$ et $b = 7 \text{ mm}$ les dimensions de l'élément actif, $p = 0,5 \text{ mm}$ l'espace inter-éléments (pitch), $N = 32$ étant le nombre d'éléments constituant une loi focale, focale définie à $F = 5 \text{ mm}$ par une loi de retard [1]. Ainsi, les résolutions latérales sont estimées à $42 \times 95 \mu\text{m}^2$. Dans le cas du déplacement des fibres entre les moules, le contre-moule est considéré comme sabot. Dans ce cas, la distance focale est la distance entre la face inférieure du contre-moule et la zone d'inspection. La distance focale F [1, 11] est définie inférieure à la limite de champ proche pour une source rectangulaire par $Np = K_r X^2 / (4c_L)$, où K_r est une constante liée au rapport des ouvertures dans les deux direction x et y . Pour le transducteur utilisé de fréquence $f = 10 \text{ MHz}$, $K_r = 1$ selon le fabricant [11], les limites de champ proche sont de l'ordre de 419 mm dans l'eau, 377 mm pour la résine époxy liquide et 227 mm pour la résine durcie.

3.2 Calibration

Afin de calibrer le dispositif de balayage, plusieurs étapes de calibration sont nécessaires. La première consiste à évaluer les possibilités de détection de manque de matière et le dimensionnement d'un réseau de trous périodique de diamètre égal à 3 mm . Ce réseau de trous translate entre les moules et contre-moule en aluminium. La configuration utilisée a conduit à des échantillonnages spatiaux donnés par :

$$\begin{cases} x_{if}(n_{if}) = (n_{if} - 1) \cdot p \\ y_{acq}(n_{acq}) = n_{acq} \cdot v_{bm} \cdot T_{acq} \end{cases} \quad (5)$$

La vitesse de balayage mécanique doit être choisie pour assurer une cohérence des échantillonnages (x, y) , dont le pas est imposé selon x par le pas inter-élément $p = 0,5 \text{ mm}$ et celui selon y résulte de $v_{bm} \cdot T_{acq}$. Ainsi, des valeurs ont été choisies à $v_{bm} = 0,34 \text{ mm/s}$ et $T_{acq} = 200 \text{ ms}$.

Un effet de distorsion peut être observé si la vitesse de balayage électronique v_{be} est comparable à celle de balayage mécanique v_{bm} . Dans notre configuration, la vitesse de balayage électronique $v_{be} = N_{if} \cdot p \cdot f_{acq} = 970 \text{ mm/s}$ est très grande devant la vitesse de balayage mécanique $v_{bm} = 0,34 \text{ mm/s}$. Cet artefact est donc évité.

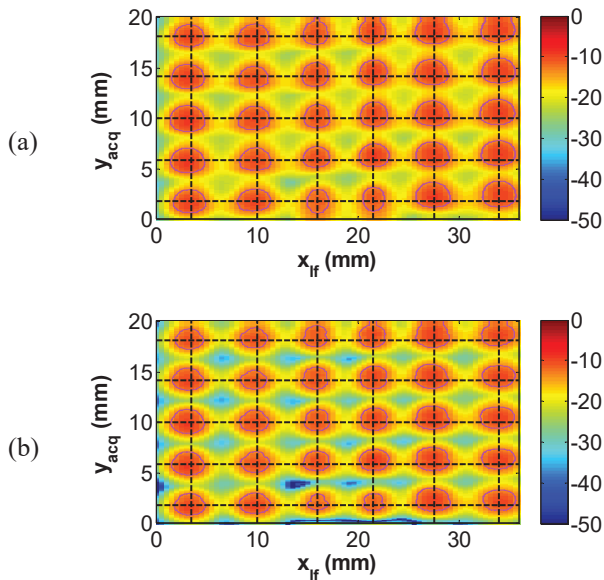


FIGURE 3 – Calibration expérimentale : (a) C-scan de l'écho de fond, en dB ; (b) C-scan de l'écho suivant une coupe selon l'axe de propagation z , en dB.

L'évaluation de la taille des trous est comparée pour chacune des calibrations expérimentales sur l'écho de fond (Figure 3 (a)). Le C-scan obtenu en effectuant une coupe suivant l'axe de propagation z (Figure 3 (b)), permet une amélioration de la dynamique. Afin d'évaluer la précision des résultats ainsi obtenus (Figure 3 (b)), les diamètres de trous ont été évalués selon les deux directions balayées : sur 5 lignes $y_{acq} = \{1,8; 5,9; 10; 14,2; 18,2\}$ mm en fonction x_{If} (Figure 4 (a)) et sur 6 colonnes $x_{If} = \{3,5; 10; 21,6; 22; 27,5; 34\}$ mm en fonction de y_{acq} (Figure 4 (b)). Les diamètres de trou ont été évalués avec un seuil relatif fixé à -6 dB : $D_x = 3,1 \pm 0,5$ mm et $D_y = 3,09 \pm 0,07$ mm.

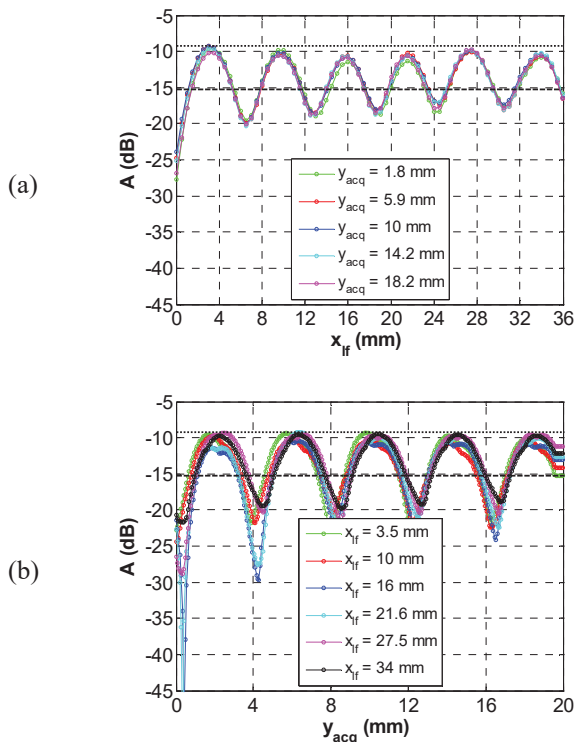


FIGURE 4 – Comparaison des enveloppes de détection de manque de matière : (a) suivant x_{If} ; (b) suivant y_{acq} pour un C-scan selon l'axe de propagation z .

3.3 Résultats

Cette méthode de caractérisation de manque de matière est alors appliquée à un tissu de fibres de carbone (AS7 satin 5 12K 500 g/m²). Des défauts de matière de taille variable ont été disposés afin d'évaluer leur détectabilité. Ce tissu de fibres de carbone est en translation avec une vitesse de balayage mécanique $v_{bm} = 0,83$ mm/s entre les moules, avec une période d'acquisition $T_{acq} = 200$ ms.

Comme l'illustrent les résultats expérimentaux (Figure 5), les défauts de fibres visibles sur la photographie (Figure 5 (a)) le sont aussi sur le C-scan (Figure 5 (b)). Ainsi, on y observe de plus un défaut non visible sur la photographie du fait que les torons déplacés lors de la perforation localisée en $x_{If} = 23$ mm se sont vraisemblablement décalés sur toute leur longueur (Figure 5 (b)). Via un seuil à -6 dB, la largeur du trou dans les fibres centré en $x_{If} = 23$ mm est estimé pour $y_{acq} = 14,5$ mm selon x_{If} à 6 mm $\pm 0,5$ mm. De même, le trou dans les fibres centré en $x_{If} = 16$ mm est estimé pour $y_{acq} = 14,5$ mm selon x_{If} à $4,5$ mm $\pm 0,5$ mm.

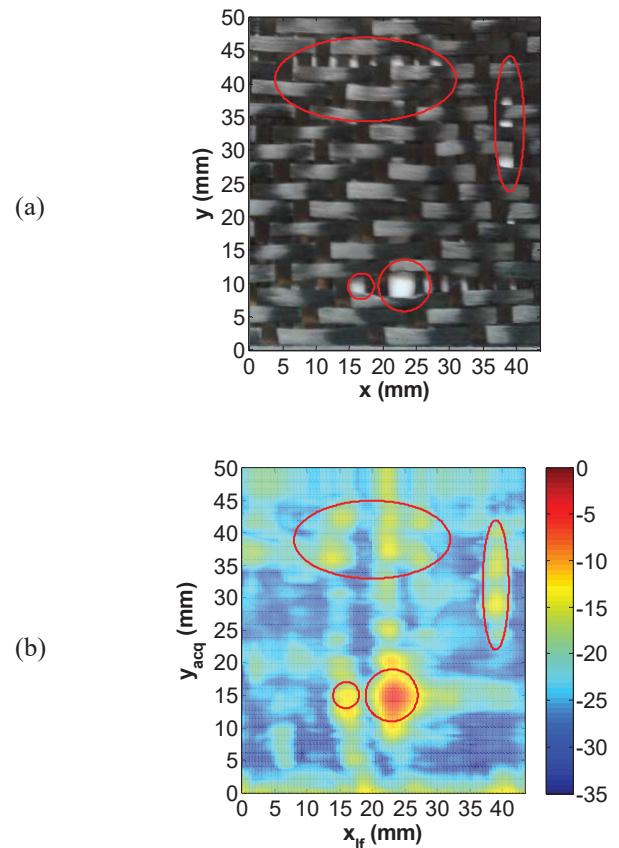


FIGURE 5 – Détection de défaut de torons de fibres de carbone : (a) photographie de l'échantillon et des défauts ; (b) C-scan correspondant de l'écho de fond en dB.

Sur cet échantillon, le C-scan de l'écho de fond fait apparaître les défauts de matière car source d'une forte échogénicité. Les torons sont eux aussi suffisamment contrastés acoustiquement pour être détectés, à condition d'extraire l'écho renvoyé par les torons eux-mêmes. Ainsi, le C-scan obtenu en effectuant une coupe suivant l'axe z , permet de retrouver la texture du pli (Figure 6) résultant de l'arrangement organisé de torons. Globalement, on peut relever la longueur et la largeur de chaque tronçon de toron tel qu'il est visible sur la photographie (Figure 5 (a)). Ainsi, on parvient à en estimer la largeur autour de 3 mm, selon y_{acq} , direction échantillonnée à $v_{bm} \cdot T_{acq} = 0,17$ mm.

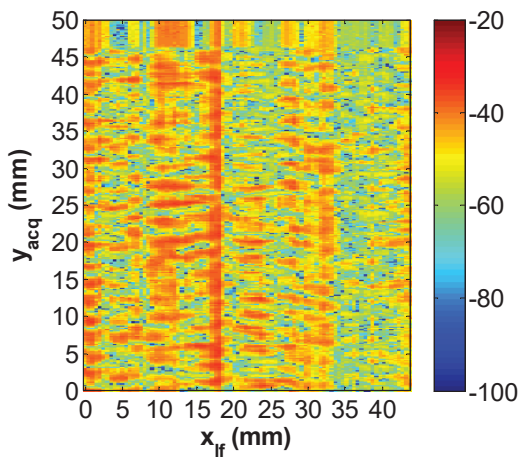


FIGURE 6 – Détection du tissage de torons de fibres de carbone constituant le pli pour un C-scan selon l'axe de propagation z en dB.

3.4 Caractérisation d'un composite

La détection de matière par échographie ultrasonore résulte directement des propriétés des milieux en contact et du contraste acoustique résultant. Ainsi, un matériau composite constitué de plis de fibres présente une hétérogénéité de sa constitution selon son épaisseur et donc une détection et une localisation possibles des défauts et des propriétés ultrasonores. Dans un premier temps (Figure 7 (a)), un échantillon epoxy/carbone constitué de 12 plis de fibres de carbone est inspecté. Dans cette configuration en immersion dans l'eau, le transducteur est en translation par rapport à l'échantillon. Un C-scan de l'écho de surface (Figure 7 (b)), lié à l'impédance acoustique de surface, permet de distinguer le tissage des torons.

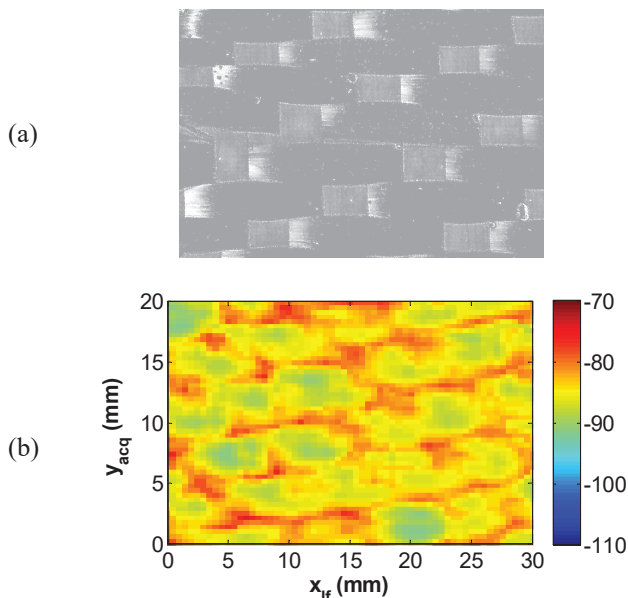


FIGURE 7 – Détection de propriétés de surface d'un composite epoxy/carbone : (a) photographie de l'échantillon étudié ; (b) C-scan sur l'écho de surface en dB.

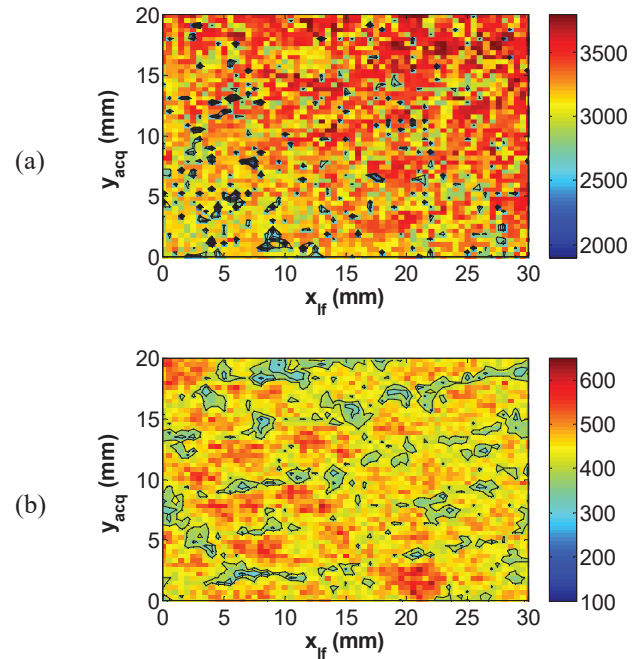


FIGURE 8 – Caractérisation des propriétés ultrasonores longitudinales effectives d'un composite epoxy/carbone : C-scan de (a) vitesse c_L (m/s) ; (b) atténuation α_L (Np/m).

Une seconde approche, celle décrite dans la partie théorique est basée sur les deux premiers échos réfléchis par un échantillon en immersion (éq. (1)). La fonction de transfert résultante (éq. (2)) permet d'évaluer les propriétés ultrasonores longitudinales effectives du matériau composite inspecté. Ainsi, on obtient un C-scan de ces propriétés avec une résolution de détection (éq. (4)) et une définition de balayage imposée par les conditions de balayage expérimentales (éq. (5)).

Comme l'illustrent les cartographies C-scan, les points de mesure relevés sur un rectangle de $30 \times 20 \text{ mm}^2$ présentent une dispersion importante. La vitesse longitudinale (Figure 8 (a)) varie localement de 1800 à 3800 m/s, avec des variations ponctuelles importantes. L'atténuation longitudinale (Figure 8 (b)) varie localement de 280 à 580 Np/m, avec des variations qui rappellent les motifs observés sur le C-scan sur l'écho de surface (Figure 7 (b)). Ainsi, on peut supposer que l'échogénicité réduite localement en surface est due à une atténuation importante, dépassant 600 Np/m, résultant de la dissipation de l'onde ultrasonore incidente dans les torons affleurant en surface.

La répartition statistique des valeurs obtenues est représentée sous la forme d'histogrammes. La vitesse (Figure 9 (a)) varie localement de 2700 à 3700 m/s, avec une moyenne à 3200 m/s; l'atténuation (Figure 9 (b)) varie localement de 300 à 600 Np/m, avec une moyenne à 440 Np/m. Une telle dispersion des propriétés est liée au fait que la résine a été coulée à pression ambiante le long des 12 plis de fibres constituant le futur échantillon de composite.

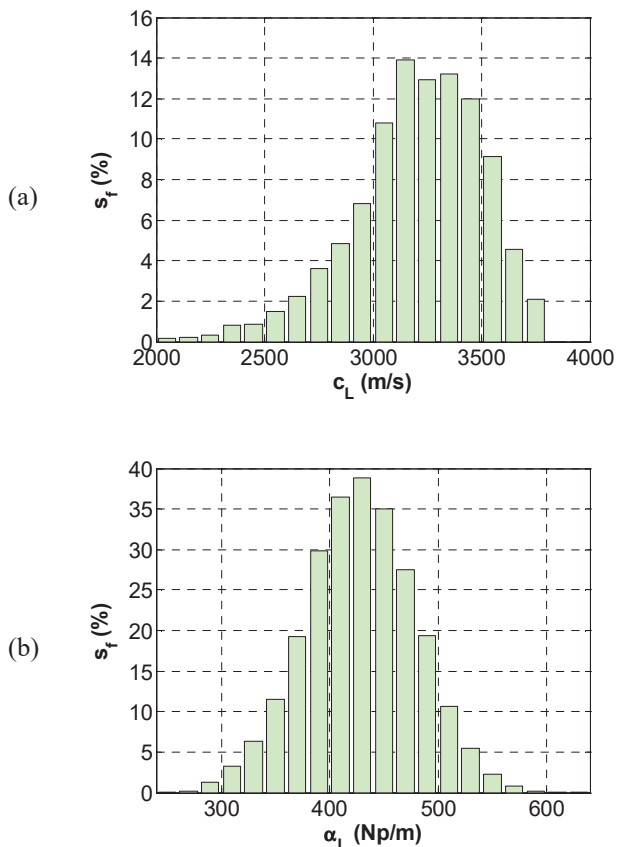


FIGURE 9 – Propriétés longitudinales effectives d'un composite époxy/carbone : fraction surfacique s_f (%) de (a) vitesse c_L (m/s) ; (b) atténuation α_L (Np/m).

5 Conclusion

A travers cette étude, la faisabilité de la détection de défaut de matière a été démontrée à l'échelle du dixième de millimètre. La résolution effective obtenue est celle imposée par le pas inter-élément (pitch) selon x , et par le produit du balayage mécanique v_{bm} et de la période d'acquisition T_{acq} selon y . Par ailleurs, la caractérisation et l'évaluation de la dispersion de propriétés d'échantillons de composites a été illustrée sur un échantillon relativement dispersif. Une telle méthode d'analyse permet d'obtenir un diagnostic et une caractérisation rapide en cours de fabrication. Le temps d'une acquisition pour une zone de $48 \times 20 \text{ mm}^2$ est de 12 s, environ. Cette vitesse d'inspection surfacique peut encore être optimisée via l'échantillonnage et l'épaisseur du moule à traverser. Le temps de traitement des données se fait aussi rapidement, et peut aussi être sensiblement amélioré. Procéder à une telle inspection via un transducteur multiéléments 2D en lieu et place de celui 1D utilisé ici, permettrait de s'affranchir du balayage mécanique. Reste à surmonter, la limite de fonctionnement en température via une ligne à retard et/ou un refroidissement intégré, pour de tels transducteurs, dont les éléments piézoélectriques se dépolarisent souvent dès 120°C , alors que les cycles usuels de polymérisation nécessitent des températures atteignant 180°C . En perspective, le suivi des propriétés ultrasonores effectives lors de la fabrication des composites [12] avec les transducteurs multiéléments est envisagé une focalisation variable en fonction du temps.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la Région Haute-Normandie pour le financement des équipements et C. Leber de la plate-forme technologique pour ses conseils et la fourniture d'échantillons.

Références

- [1] N. Samet, "Evaluation ultrasonore des propriétés d'une résine et détection de porosité à l'aide d'un transducteur multiéléments. application aux matériaux composites au cours de fabrication," Thèse, Université du Havre, 2012.
- [2] N. Duong, J. Duclos, P. Maréchal, and P. Pareige, "Cartographie ultrasonore d'une plaque de composite rtm: Estimation de l'atténuation locale," in *Congrès Français d'Acoustique (CFA)*, 79–84, 2014.
- [3] N. Samet, P. Maréchal, and H. Duflo, "Ultrasonic imaging of bubble motion in a fiber preform," in *Acoustics 2012*, 2012.
- [4] Y. Gélébart, "Évaluation non destructive par ultrasons du vieillissement thermique d'une structure composite," Thèse, Université du Havre, 2007.
- [5] N. Samet, P. Maréchal, and H. Duflo, "Ultrasound monitoring of bubble size and velocity in a fluid model," *NDT&E International*, 44, 621–627, 2011.
- [6] X. Deng, T. Monnier, P. Guy, and J. Courbon, "Acoustic microscopy of functionally graded thermal sprayed coatings using stiffness matrix method and stroh formalism," *Journal of Applied Physics*, 113, 224508:1–10, 2013.
- [7] M. Messineo, G. Rus, G. Elisabe, and G. Frontini, "Layered material characterization using ultrasonic transmission. an inverse estimation methodology," *Ultrasonics*, 65, 315–328, 2016.
- [8] N. Samet, P. Maréchal, and H. Duflo, "Ultrasonic characterization of a fluid layer using a broadband transducer," *Ultrasonics*, 52, 427–434, 2012.
- [9] Dal Maso, F. and Meziere, J., "Calcul des propriétés élastiques des tissus utilisés dans les matériaux composites," *Rev. Inst. Fr. Pét.*, 53, 857–870, 1998.
- [10] N. Duong, "Cartographie et caractérisation acoustique des matériaux. application à l'évaluation du taux volumique de fibre dans un matériau composite," Thèse, Université du Havre, 2015.
- [11] Olympus, "Phased array testing: Basic theory for industrial applications," *NDT Field Guides*, 1–105, 2010.
- [12] N. Ghodhbani, P. Maréchal, and H. Duflo, "Curing and post-curing viscoelastic monitoring of an epoxy resin," *Physic Procedia*, 70, 106–109, 2015.