

## ANALYSE PAR LA TRANSFORMÉE D'ONDETTES DE DELAMINAGE ET POROSITÉ DANS LES COMPOSITES STRATIFIÉS

Reçu le 31/01/2009 – Accepté le 30/06/2009

### Résumé

Le recours aux ultrasons pour l'évaluation non destructive des composites stratifiés constitue un outil d'investigation privilégié pour la recherche, la détection et la caractérisation des défauts critiques dissimulés éventuellement dans ces matériaux. Les défauts recherchés sont les délaminages, les inclusions, les fissures et les porosités. Dans le cas de l'examen des plaques composites minces, la localisation d'un défaut interne ou proche de la surface fournit des signaux ultrasonores complexes dont l'analyse requiert des méthodes de traitement très avancées et plus raffinées que les techniques classiques. Cette étude porte sur l'analyse par ondelettes en intégrant le choix de l'ondelette analysante et le niveau de résolution. Elle est appliquée aux signaux ultrasonores obtenus lors du sondage de plaques minces stratifiées pour la détection et l'identification des défauts dans ces matériaux composites. Ils renferment des défauts incorporés ou artificiels (délaminages) et réels (porosités). Les coefficients calculés de la transformée en ondelettes ont été utilisés pour la détection et la localisation des positions de défauts dont les résultats sont en bon accord avec les données expérimentales.

**Mots clés :** *Ultrasons, Composites, Evaluation, Délaminage, Porosité, Transformée en Ondelettes.*

### Abstract

The use of the non-destructive ultrasonic evaluation of composite laminates constitutes a privileged investigating tool for the research, the detection and the characterization of critical hidden flaws in these materials. The defects searched are delaminating, inclusions, cracks and porosities. In the case of the examined thin composite laminate plates, the localization of an interne defect or near the surface provides complex ultrasonic signals whose analysis requires some very advanced and more refined processing techniques than the classical ones. This study carries on the wavelet analysis and shows that the defects detection in composite materials is optimal by using the wavelet analysis. It is applied to ultrasonic signals measured by probing thin stratified composite plates for the detection and identification of flaws by integrating the choice of the mother wavelet and the resolution level. Samples are constituted of a unidirectional weave of an E type fibreglass and epoxy resin in which dissimulated artificial defects (delaminating) and real (porosities) are enclosed. The wavelet transforms calculated coefficients have been used for the detection and localization of flaw positions whose results are in good agreement with experimental data.

**Keywords :** *Ultrasounds, Composites, Evaluation, Delamination, Porosity, Wavelet*

*Transforms.*

M.O. SI-CHAIB<sup>1</sup>

A. YAHYAOU<sup>1</sup>

B. NECIB<sup>2</sup>

A. NOUR<sup>1</sup>

S. RECHAK<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Dynamique des Moteurs et Vibroacoustique, Université Boumerdes - Algérie

<sup>2</sup>Laboratoire de Mécanique Université Mentouri Constantine – Algérie

<sup>3</sup>Laboratoire de Mécanique et Développement – Ecole Nationale Polytechnique – Alger - Algérie

### ملخص

التقييم بالتقنية الغير مدمرة المستعملة للأمواج الميكانيكية ما فوق الصوتيات لدراسة المواد الغير متجانسة والمتعددة الطبقات يشكل أداة استقصاء ذات امتياز للبحث , والكشف , والتشخيص للأعطاب الحرجة المخفية. الأعطاب المتقصية هي الغير المصفحة , الرواسب , التشققات والمسامات. في حالة فحص الصفائح الرقيقة المتعددة الطبقات, حصر عطب داخلي أو قريب من السطح يحصل على إشارات موجية ما فوق الصوتيات معقدة. هذه الإشارات تتطلب وسائل تحليل جد متطورة و مدققة بالمقارنة بالتقنيات المعتادة.

دراسة البحث هذه تعالج التحليل بالتحويلات الموجية باختيار التحويلة المحللة و مستوى التحويلة. طبقت هذه الدراسة على الإشارات المعقدة ما فوق الصوتيات عند سبر الصفائح الرقيقة المتعددة الطبقات للكشف , والتشخيص للأعطاب الحرجة المخفية. العينات مؤلفة من الطبقات الرقيقة ذي عشرة طبقات من نسيج وحيد الاتجاه ذي ألياف من نوع زجاج (E) و مادة " أبكسي" (Epoxy). هذه العينات مأونة من الرواسب أو فجوات مصنعة و مسامات حقيقية. سمك الطبقة يساوي بالتقريب 0.3 مم. النتائج المحصلة لمعاملات التحويلات الموجية طبقت للبحث , والكشف , والتشخيص للأعطاب الحرجة المخفية. المعلومات النظرية المحصلة عليها تطابق المعطيات

**الكلمات المفتاحية:** الموجات ما فوق الصوتيات, مواد المتعددة الطبقات, التقييم, الأعطاب, الغير المصفحة, المسامات, التحويلات الموجية.

Les composites stratifiés trouvent de larges applications technologiques dans l'industrie aéronautique, les constructions navales et l'industrie automobile. Ils permettent la conception et la fabrication de structures performantes possédant de bonnes propriétés mécaniques alliées à un poids minimal. Pour une évaluation non destructive de l'intégrité des matériaux composites, l'analyse par ultrasons constitue un outil d'investigation privilégié pour la recherche et l'évaluation quantitative d'un défaut pour identifier sa position, sa morphologie et sa taille. La méthode consiste à sonder le milieu à l'aide d'une onde ultrasonore, produite par un transducteur, et à enregistrer les échos réfléchis par des inhomogénéités qui peuvent être des défauts [1], [2]. Le signal réfléchi pourrait ensuite subir un traitement approprié et une analyse de diagnostic pour rechercher des défauts éventuels dans des composites en résine d'époxyde renforcés par des fibres de verre, de carbone ou d'aramide. Les défauts recherchés sont du type délaminage, dédoublement "bridging", inclusion et porosité. A noter que la présence de défauts dans un composite, pourrait conduire à une altération significative de ses caractéristiques mécaniques. Les composites fibres - renfort possèdent une atténuation acoustique et un bruit structural élevé dû à la dispersion des ondes ultrasonores par les couches (fibres-renfort) et aux réflexions multiples à l'intérieur des échantillons provoquées par différentes impédances acoustiques des couches. Cet obstacle soulève un autre problème dans les applications des méthodes d'évaluation non destructives par ultrasons.

La détection des défauts dans les matériaux dépend de la fréquence et de la largeur de bande ultrasonore du signal, du parcours et de la distance d'inspection, de la position et la taille de défauts et des propriétés du matériau [3]. L'énergie absorbée du champ acoustique est irréversiblement perdue en ondes incohérentes et divergentes. C'est le résultat d'interaction de l'onde avec des hétérogénéités dans le matériau. La dispersion par les composants de microstructure d'un matériau occasionne des difficultés sévères dans la détection des discontinuités, car elle réduit le rapport du signal sur bruit ou rapport signal - bruit. Ces problèmes prouvent que le contrôle non destructif des composites exige un soin particulier pour le choix de la fréquence et l'interprétation du signal [3]. Dans ce domaine, l'analyse de Fourier et la Transformée de Fourier Rapide sont souvent utilisées. Mais, cette investigation est limitée à la fréquence. Dans les années récentes, des techniques de transformations temps - fréquence ont été développées. Parmi celles-ci, la transformée en ondelettes qui permet d'obtenir une distribution temps - fréquence sous le principe d'une analyse multirésolution [4-6].

La détection et la caractérisation des délaminages contenus dans les plaques minces stratifiées en composite soulèvent certaines difficultés notoires, comme dans le cas des délaminages minces où l'épaisseur pour laquelle la longueur d'onde spatiale est inférieure à l'impulsion ultrasonore. Une des solutions possibles est d'utiliser des transducteurs ultrasonores à larges bandes qui permettent une haute résolution afin de pouvoir détecter les délaminages dans les échantillons minces [7]. Pour la

localisation en profondeur de défauts contenus dans des composites, des signaux ultrasonores de mesures ont été obtenus [8]. L'information relative à la profondeur est extraite à partir de l'enveloppe complexe des coefficients d'ondelette et au moyen de deux méthodes de réseau de neurones.

Une méthode d'évaluation de la porosité a été conçue sur la base d'une estimation automatique de l'atténuation ultrasonore dont la détermination repose sur l'estimation de l'amplitude du signal et du rapport d'énergie entre deux échos successifs [9]. La méthode d'évaluation de la porosité a été appliquée aux signaux ultrasonores mesurés sur des matériaux composites avec différents niveaux de porosité.

L'opération de débruitage des signaux a été réalisée par l'analyse d'ondelettes. Sur le plan de mise en oeuvre d'échantillons d'essai en composite, l'étape particulièrement délicate réside dans le fait qu'elle peut engendrer des discontinuités ou défauts dans la matrice. Les délaminages, dus à un manque de colle ou à une mauvaise polymérisation de la matrice, représentent une mauvaise adhésion entre deux couches ou un décollement complet des deux couches dans le cas d'un délaminage franc [10]. Ils sont donc caractérisés par une rupture d'impédance assez importante. Leur modélisation se fait par insertion dans le matériau stratifié d'une couche de très faible épaisseur et d'impédance caractéristique faible devant les impédances des couches constituant le matériau [5].

La porosité est la conséquence d'un manque de colle qui demeure ponctuel. Elle est donc assimilable à des bulles de petites dimensions réparties de façon homogène dans le matériau ou concentrées sur quelques plis [5]. La présence de porosité dans un composite peut entraîner une diminution significative de ses caractéristiques mécaniques en augmentant la dispersion de ses valeurs. Un matériau composite de qualité contiendra moins de 1% en volume de porosité, alors qu'un composite de médiocre qualité pourra atteindre 5% [10].

Les défauts recherchés dans la présente étude sont les délaminages "défauts simulés ou artificiels" et les porosités "défauts réels". Trois plaques d'un stratifié en composite ont été confectionnées dont les dimensions sont de  $80 \times 80 \text{ mm}^2$  et l'épaisseur est de 3 mm environ. Chaque échantillon est constitué de 10 plis d'un tissage unidirectionnel de fibre de verre type E et de résine époxy. Dans l'étape actuelle des travaux menés, le choix d'un composite de tissage unidirectionnel de fibres a été privilégié afin d'orienter les segments insérés de téflon, simulant un délaminage suivant la direction de symétrie.

Dans sa partie théorique, cette étude est consacrée à une introduction aux fondements de base de l'analyse d'ondelettes. Les éléments théoriques de cette analyse sont appliqués pour mener l'étude expérimentale. Elle est traitée au moyen de l'analyse par transformée d'ondelettes discrète en intégrant le choix de l'ondelette analysante et le niveau de résolution. La transformée en ondelettes discrète du signal ultrasonore est calculée en utilisant l'algorithme de la transformée en ondelettes orthogonale rapide implanté dans Matlab.

Le recours à la décomposition en ondelettes orthogonales du signal permet de déterminer, à chaque niveau de résolution, les approximations et les informations de détails du signal considéré.

Les coefficients calculés de la transformée en ondelettes ont été utilisés pour la détection et la localisation des positions de défauts.

## 1. Méthode d'analyse par la transformée d'ondelettes

### 1.1. Méthodes d'applications de la transformée en ondelettes

La méthode d'ondelettes trouve des applications dans le traitement de signaux transitoires non stationnaires qui varient simultanément dans les domaines temps et fréquence [11-13].

En évaluation non destructive, cette méthode est adoptée pour l'amélioration de la détection de défauts [14]. Les méthodes d'ondelettes prévoient des outils puissants pour analyser, chiffrer, comprimer, reconstruire et modéliser des signaux et des images. Ils sont utiles pour capturer, identifier et analyser des procédés localement multi-échelles et non stationnaires, pour permettre d'explorer des aspects de données que les autres techniques d'analyse omettent.

La transformée en ondelettes (T.O) a été appliquée pour améliorer la détection ultrasonore des défauts dans les signaux bruités. La T.O est la technique la plus récente pour le traitement des signaux avec des spectres changeant avec le temps. Cette méthode utilise l'échelonnage dans le domaine temps pour échelonner une seule fonction dans le domaine fréquence. La fonction ondelette mère est utilisée pour extraire des détails et informations dans les domaines temps-fréquence à partir des signaux transitoires à analyser.

La transformée en ondelettes décompose un signal  $s(t)$  en une somme de contributions élémentaires appelées ondelettes [15]. Elle constitue une corrélation entre le signal et un ensemble d'ondelettes de base. Le concept de l'ondelette temps-fréquence réside dans la division de l'onde en segments et ne considère qu'un seul segment qui représente une tranche du signal de l'onde. Pour décomposer un signal en une série d'ondelettes, les conditions suivantes doivent être vérifiées [16-17]:

- Condition d'admissibilité :  $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$
- Condition de localisation :  $\lim_{|t| \rightarrow \infty} \psi(t) \rightarrow 0$
- Condition d'oscillation :  $\int_{-\infty}^{\infty} t^{n-1} \psi(t) dt = 0$  pour  $0 < n < m$

L'intégrale de  $\psi(t)$  doit être égale à zéro et la même condition est vérifiée pour les premiers mouvements  $m$  de  $\psi$ .

Le choix de l'ondelette peut être guidé par :

- un bon compromis de résolution temps / fréquence,
- des propriétés mathématiques : moments nuls, régularité, etc.
- une forme proche d'un motif que l'on veut mettre en évidence dans le signal sans en connaître exactement l'échelle. Il existe une infinité d'ondelettes. Un choix typique de  $\psi$  est l'ondelette de Morlet ou chapeau mexicain.

La première famille d'ondelettes présentée par J. Morlet [11] est issue de la fonction :

$$\psi(t) = e^{-(\alpha^2 t^2)/2} e^{i2\pi f_0 t} \quad (1)$$

Une famille de fonctions élémentaires obtenues par translation et dilatation (ou contraction) est construite à partir de l'ondelette mère ou ondelette analysante  $\psi$  :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a > 0, b \in R \quad (2)$$

$\psi_{a,b}(t)$  : représente les ondelettes filles

a : est lié à la fréquence (paramètre d'échelle)

b : est lié au temps (paramètre de translation)

Les coefficients d'ondelettes  $X_{TO}(a,b)$  du signal  $s(t)$  sont donnés par:

$$X_{TO}(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (3)$$

La transformée de Fourier de l'ondelette fille  $\psi_{a,b}(t)$  est donnée par :

$$\psi_{a,b}(f) = \sqrt{a} \psi(af) e^{-i2\pi fb} \quad (4)$$

Où :  $\psi(f)$  représente la transformée de Fourier de l'ondelette mère. Cette équation montre le concept important qu'une dilatation  $t/a$  dans le domaine temps est équivalente à un changement de fréquence de  $af$ . Si les variables  $a$  et  $b$  sont limitées à des valeurs entières, alors la transformée en ondelettes devient la transformée en ondelettes discrète (TOD) :

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m} t - n), \quad m, n \in Z \quad (5)$$

Où :  $\psi_{m,n}(t)$  constitue une famille de fonctions orthonormées.

La transformée en ondelettes discrète (TOD) d'un signal analogique temporel est donnée par [17]:

$$X_{TOD}(m,n) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{m,n}^*(t) dt \quad (6)$$

A noter que la fonction à deux variables  $s(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$  constitue la transformée en ondelette continue de la fonction  $s(t)$ . C'est une représentation temps-échelle appelée "Transformation en ondelettes".  $s(a,b)$  constitue le coefficient d'ondelette et  $\psi$  l'ondelette analysante. Par différentes méthodes appliquées au signal en utilisant les ondelettes, il est possible d'arriver à débruiter ou à comprimer des signaux ou des images en annulant les coefficients d'ondelettes les moins significatifs.

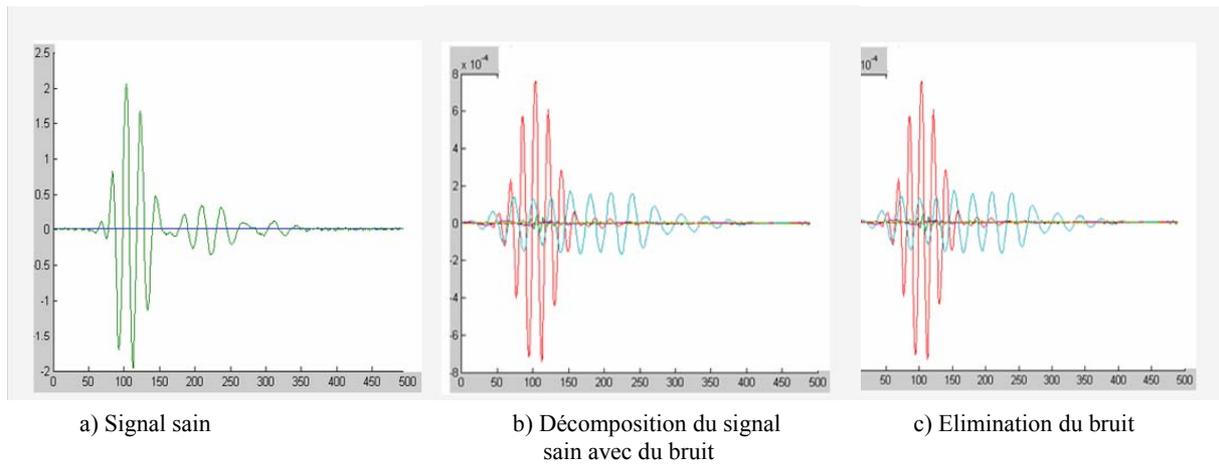
$$G_s(\omega, t) = \int_R s(u) g(t-u) e^{-i\omega u} du \quad (7)$$

Où :  $s(u)$  représente le signal

L'analogie de cette formule avec celle des coefficients d'ondelettes est la suivante:

$$C(a, t) = \int_R s(u) \left(\frac{1}{\sqrt{a}}\right) \psi\left(\frac{t-u}{a}\right) du \quad (8)$$

Les grandes valeurs de  $a$  correspondent aux petites valeurs de  $\omega$ .



**Figure 1 :** Décomposition par ondelettes d'un signal sain bruité [26]

A titre d'exemple, la figure 1 illustre la décomposition d'un signal de mesures fourni par une sonde ultrasonore en immersion. A rappeler que le bruit correspond aux faibles coefficients dont la suppression élimine le bruit.

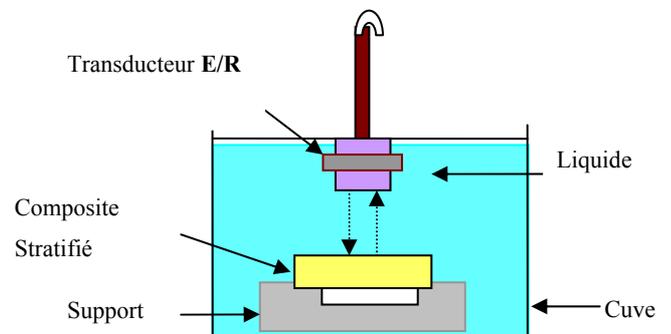
## 1.2. Relation entre l'analyse d'ondelettes et l'analyse de Fourier

L'analyse d'ondelettes complète l'analyse de Fourier [18]. L'analyse de Fourier utilise les fonctions de base  $\sin(\omega t)$ ,  $\cos(\omega t)$  et  $\exp(i\omega t)$  [19]. Ces fonctions sont parfaitement bien localisées dans le domaine fréquence. Elles sont adaptées à l'analyse et à la synthèse de signaux avec un simple spectre. Mais, elles ne sont pas localisées dans le domaine temporel : par exemple,  $\sin(\omega_1 t) + 0.5 \sin(\omega_2 t) - \cos(\omega_3 t)$ . C'est difficile pour ces fonctions d'analyser ou de synthétiser des signaux complexes présentant des variations locales rapides tel que des changements transitoires ou abrupts: les coefficients de Fourier pour une pulsation  $\omega$  ou fréquence dépendront de toutes les valeurs du signal. Pour limiter les difficultés qui en résultent, il est possible de "fenêtrer" le signal en utilisant une fonction régulière, qui est zéro ou presque zéro en dehors du segment temps  $[-m, m]$ .

Les coefficients de l'analyse de Fourier à fenêtre sont les coefficients doublement indexés:

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DE DELAMINAGES ARTIFICIELS ET DE POROSITE

La chaîne de mesure électroacoustique comprend un générateur d'ultrasons émetteur - récepteur de bande passante de 25 MHz et un transducteur ultrasonore émetteur/récepteur de fréquence 5 MHz permettant de générer des ondes longitudinales dans l'échantillon. Le contrôle se fait en immersion dans une cuve remplie d'eau permettant d'assurer le couplage acoustique entre le transducteur et la pièce examinée (figure 2).

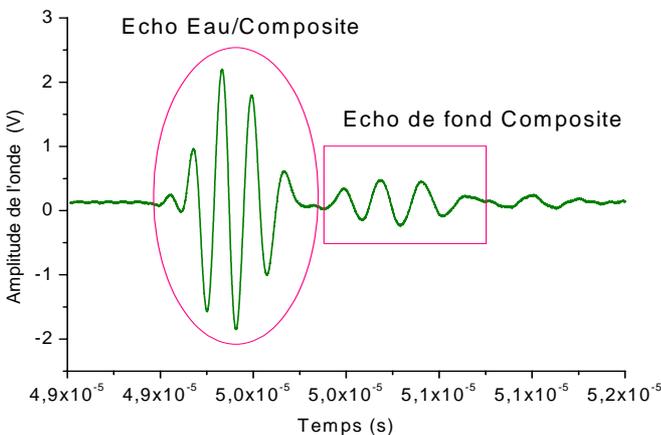


**Figure 2 :** Contrôle par immersion en mode par écho

Les signaux sont visualisés sur un oscilloscope numérique permettant leurs échantillonnages avec des vitesses allant jusqu'à 500 Méch/s et une bande passante de

100 MHz. L'ensemble est piloté par un micro-ordinateur via une interface GPIB.

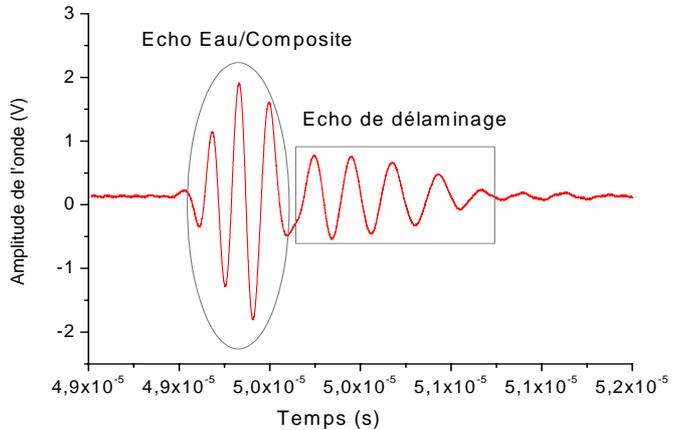
Les essais par ultrasons ont été pratiqués sur trois plaques d'épaisseur 3 mm environ et de dimensions 80\*80 mm<sup>2</sup>. Ces échantillons sont constitués de dix plis d'un tissage unidirectionnel de fibre de verre type E et de résine époxy. L'épaisseur du pli est de 0.3 mm environ. Des segments de téflon d'épaisseur 0.075 mm ont été insérés entre les plis à différentes profondeurs pour simuler des délaminages [20]. Lors du sondage, les ondes ultrasonores émises se propagent dans l'eau (couplant) puis dans le composite stratifié (figure 2). Aux interfaces rencontrées, en particulier les deux faces parallèles de la pièce, il y a réflexion de l'onde ultrasonore émise. L'onde réfléchie est reçue par le transducteur et transformée en impulsion électrique et visualisée sur l'écran d'un oscilloscope numérique. Concernant la caractérisation du défaut, les informations à extraire de la décomposition sont : son amplitude, sa profondeur, sa position et la bande de fréquence. La mesure de l'intervalle de temps séparant l'écho d'entrée ou d'interface (Eau /composite) et l'écho de défaut indique la profondeur du défaut. Le calcul de cette profondeur dépend de l'intervalle de temps séparant l'écho d'entrée et celui du défaut et de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore longitudinale dans le matériau composite (verre-époxy). Les essais effectués sur les trois échantillons ont permis d'obtenir une série de signaux dont un signal de référence provenant d'une zone saine. Lorsque le matériau est sain, l'oscillogramme ne présente que l'écho dû à la face d'entrée (Eau/Stratifié) et celui du fond de la pièce (figure .3).



**Figure 3 :** Signaux réfléchis des échos d'interface Eau/Composite et de fond Composite en zone saine.

Par contre s'il existe un défaut proche de la surface du matériau analysé, l'oscillogramme présente deux oscillations qui sont rapprochées : écho de surface de la pièce et celui du défaut de délaminage (figure 4). Pour les défauts de délaminage, il s'agit de défauts plans perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde longitudinale émise. Par conséquent, il est admis que ces défauts présentent une réflectivité uniforme. Selon la figure 3, la vitesse calculée de l'onde longitudinale du matériau d'essai est de l'ordre de 3916 m/s. La figure 4 représente un

signal ultrasonore en mode A-scan composé de deux échos réfléchis d'interface eau/composite stratifié et celui du défaut artificiel de délaminage intercalé entre le 5<sup>ème</sup> et le 6<sup>ème</sup> plis. L'oscillogramme indique deux échos qui se chevauchent légèrement et le bruit de structure du matériau composite n'est pas apparent.



**Figure 4 :** Signaux réfléchis des échos d'interface Eau/Composite et de défaut de délaminage en zone défectueuse.

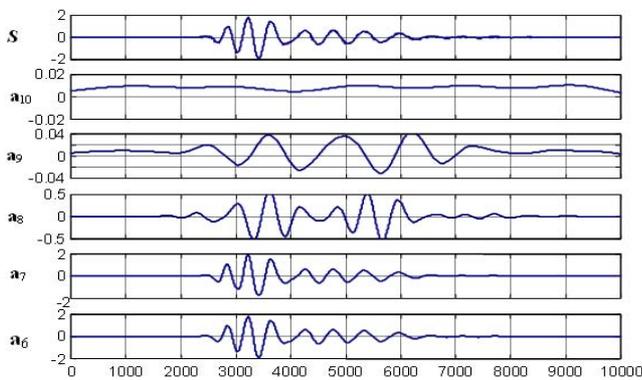
### 3. ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

Pour la décomposition des signaux, il est important de faire un bon choix de l'ondelette mère ou de l'ondelette d'analyse. Cette ondelette doit avoir les propriétés suivantes: symétrie, orthogonalité et possibilité de son utilisation pour la transformée en ondelettes discrète (TOD). Un groupe d'ondelettes mère a été testé : l'ondelette de Haar, l'ondelette de Daubechies, l'ondelette de Meyer discrète et l'ondelette de Coiflet [21]. Le meilleur résultat est obtenu avec l'ondelette Coifman appelée aussi Coiflet type C-5 pour les signaux réfléchis par des délaminages. Les signaux réfléchis par des porosités ont été analysés avec l'ondelette Daubechies (db4) [22-23]. La transformée en ondelettes du signal ultrasonore est calculée en utilisant l'algorithme de la transformée en ondelette orthogonale rapide implanté dans Matlab [21], [24]. Le recours à la décomposition en ondelettes orthogonales du signal permet de déterminer, à chaque niveau de résolution  $j$ , les approximations et les informations de détails du signal. La décomposition temps - fréquence permet d'identifier, à chaque instant, dans quelle gamme de fréquence l'énergie du signal est contenue. Le signal est analysé au travers d'une fenêtre temporelle de largeur finie. Le résultat de cette analyse est un spectre qualifié d'instantané et que l'on attribue à l'instant central de la fenêtre, en faisant glisser cette fenêtre sur toute la durée du signal dans le domaine temps - fréquence [25]. Contrairement à l'analyse de Fourier à court terme, qui garde fixe la taille de la fenêtre et fait varier le nombre d'oscillations à l'intérieur de cette fenêtre, la transformée en ondelettes garde constant le nombre d'oscillations et fait varier la taille de la fenêtre en l'étirant ou la comprimant. Une famille d'ondelettes est engendrée par une ondelette dite analysante subissant une translation en temps et une contraction ou dilatation en temps. Ce type de procédé

permet aux ondelettes de s'adapter automatiquement aux différentes composantes du signal. Elles utilisent une fenêtre étroite pour regarder les composantes transitoires de haute fréquence et une fenêtre large pour regarder les composantes de longue durée, de basse fréquence. Cette procédure s'appelle la multirésolution. Le signal à résolution grossière est examiné au moyen d'ondelettes larges pour en tracer l'ébauche. Ceci est suivi de l'analyse pour des résolutions fines en utilisant un grand nombre de petites ondelettes qui scrutent les détails. Le niveau de décomposition ou de résolution maximum dépend de la longueur du signal.

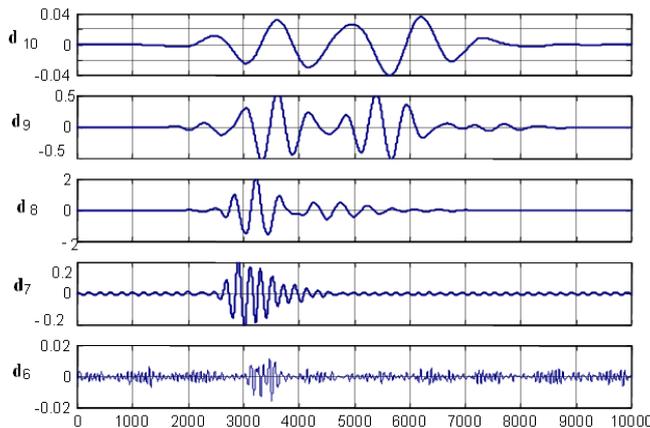
Le niveau de résolution est déterminé selon l'expression suivante [6] :

$$J = \text{Log}_2 N - 1 \quad (9)$$



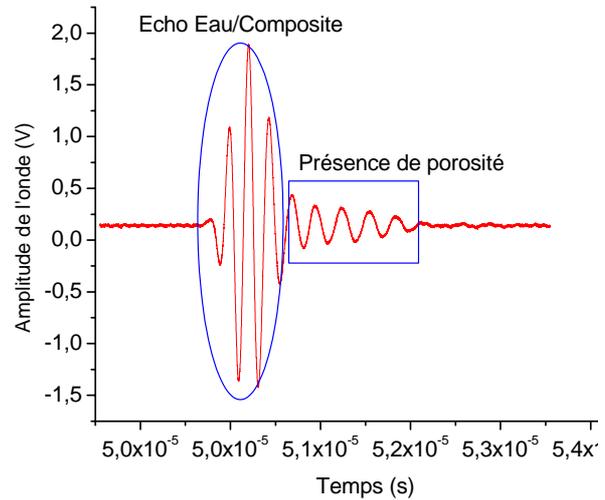
**Figure 5 :** Signaux d'approximation des niveaux de résolution 6 à 10 du signal ultrasonore  $s(t)$ .

Pour les signaux discrets contenant  $N=10000$  points, le niveau de résolution maximum  $J$  est de l'ordre de 13. Pour la présente étude, les signaux ont été décomposés jusqu'au niveau de résolution 10. Les approximations d'ondelettes de niveau élevé et bas contiennent 5000 points. Les approximations et les détails du signal ultrasonore réfléchi  $s(t)$  par le défaut de délaminage sont représentés respectivement dans les figures 5 et 6.



**Figure 6 :** Signaux de détail du niveau de résolution de 6 à 10 du signal ultrasonore  $s(t)$ .

Les niveaux d'approximations à échelle élevée représentent les composantes de basses fréquences du signal. Quant aux niveaux de détails à échelle basse, ils correspondent aux composantes de hautes fréquences du signal. A noter que le bruit haute fréquence se concentre essentiellement dans les détails  $d_1$  et  $d_2$ , tandis que le bruit basse fréquence influence les détails ( $d_9$ ) et ( $d_{10}$ ) [27]. Pour l'analyse du descripteur relatif au délaminage, l'écho de défaut (délaminage) figurant dans le signal ultrasonore  $s(t)$  a été détecté au niveau 9 du signal de détail ( $d_9$ ). Un zoom du signal de détail ( $d_9$ ) du signal ultrasonore  $s(t)$  (figure 6), permet de localiser la crête positive du signal de l'écho de défaut du délaminage. Le calcul de l'intervalle de temps séparant l'écho d'entrée de celui du défaut indique la position estimée du défaut à  $0.743 \mu\text{s}$ . Au moyen de la vitesse de propagation de l'onde longitudinale dans le composite, la profondeur évaluée du délaminage artificiel est de  $1.45 \text{ mm}$ . Ce résultat confirme que le défaut est effectivement positionné à une profondeur de  $1.5 \text{ mm}$  puisque que les segments de téflon ont été insérés entre les 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> plis et l'épaisseur du pli est de  $0.3 \text{ mm}$ .



**Figure 7 :** Signaux réfléchis des échos d'interface Eau/Composite et de défaut de porosité en zone défectueuse.

Pour la détection de porosités et l'analyse de leurs descriptifs, la même procédure est appliquée à l'analyse du signal ultrasonore réfléchi par les défauts de porosités contenus dans le composite stratifié. La figure 7 montre un signal ultrasonore en mode A-scan indiquant les signaux des échos d'interface eau/stratifié et de porosité. L'estimation par des coefficients de détail fournit une position moyenne située au 8<sup>ème</sup> pli de l'échantillon étudié.

## CONCLUSION

Les défauts recherchés dans la présente étude ont été les délaminages "défauts simulés" et les porosités "défauts réels". La méthode de la transformée en ondelettes a été appliquée pour analyser des signaux d'ondes ultrasonores longitudinales réfléchies par des délaminages (artificiels) et porosités (réelles).

L'ondelette retenue se particularise par les propriétés suivantes: symétrie, orthogonalité et possibilité de son utilisation pour la transformée en ondelettes discrète (TOD).

Pour la décomposition des signaux, un groupe d'ondelettes mère a été testé : l'ondelette de Haar, l'ondelette de Daubechies, l'ondelette de Meyer discrète et l'ondelette de Coiflet. Le meilleur résultat a été obtenu avec l'ondelette Coifman ou Coiflet type C-5 pour les signaux réfléchis par des délaminages. Les signaux réfléchis par des porosités ont été analysés avec l'ondelette Daubechies (db4).

La transformée en ondelettes du signal ultrasonore a été calculée en utilisant l'algorithme de la transformée en ondelette orthogonale rapide implanté dans Matlab. Les coefficients de la transformée en ondelettes obtenus ont été utilisés pour la détection et la localisation des défauts. Pour l'identification et la localisation des défauts, l'analyse des descripteurs relatifs aux délaminage et porosité repose sur les coefficients de la transformée en ondelettes discrète. L'analyse des signaux de détail ( $d_9$ ) du niveau 9 a mené à l'extraction des informations relatives à la nature et la profondeur des anomalies. Les résultats obtenus sont en bon accord avec les données expérimentales.

Avec un choix adapté de l'ondelette d'analyse et du niveau de résolution, le recours à l'analyse par transformée en ondelettes constitue une méthode d'investigation approfondie pour la détection et l'évaluation des défauts dans les composites stratifiés.

Les résultats obtenus mettent en relief la contribution de la méthode de la transformée en ondelettes pour l'analyse des signaux ultrasonores résultant du sondage de plaques minces stratifiées en composite.

#### NOMENCLATURE DES TERMES MATHÉMATIQUES

$\psi(t)$  : Ondelette mère ou ondelette analysante

$s(t)$  : Signal

$G_s(\omega, t)$  : Coefficients de l'analyse de Fourier à fenêtre

$C(a, t)$  : Coefficients d'ondelettes

$\psi_{a,b}(t)$  : Ondelettes fille

a : Paramètre d'échelle lié à la fréquence

b : Paramètre de translation lié au temps

$\Psi_{a,b}(f)$  : Transformée de Fourier de l'ondelette fille

$S(a, b)$  : Représentation temps-échelle de la Transformation en ondelettes

$X_{TO}(a, b)$  : Coefficients de la transformée d'ondelettes du signal  $s(t)$

$\psi_{m,n}(t)$  : Famille de fonctions orthonormées

$X_{TOD}(m, n)$  : Transformée en ondelettes discrète (TOD)

J : Niveau de résolution

N : Nombre de points contenus dans un signal discret

#### REFERENCES

- [1] Dumoulin J.P. and de Belleval J.F., Flaw classification in composites using ultrasonic echography. Edited by Adriano Alippi University of Rome La Sapienza Italy, Walter G. Mayer Georgetown University Washington DC USA. (1987).
- [2] Moukemaha J.S., Modélisation des signaux acoustiques réfléchis par un multicouche. Périodique : application à l'identification de défauts par méthodes ultrasonores. Thèse de l'Université de Technologie de Compiègne. (1991).
- [3] Pagodinas D, Ultrasonic signal processing methods for detection in composite materials. NDT.net, Vol. 8, No.07. (July 2003).
- [4] Cohen A., Ondelettes et traitement numérique du signal. Edition Masson, Paris. (1992).
- [5] Moubarik S.E, De Vadder D, Wavelets and non-destructive evaluation. Review of progress in quantitative non-destructive evaluation. Vol. 12 edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum press, New York, (1993).
- [6] Truchetet F, Ondelettes pour le signal numérique. Editions Hermès, Paris. (1998).
- [7] Kažys R. and Svilainis L., Ultrasonic detection and characterization of delaminations in thin composite plates using signal processing techniques. Ultrasonics 35, pp. 367-383, (1997).
- [8] Zhenqing LIU, Flaw echo Location based on the Wavelet transform and Artificial Neural Network. 15<sup>th</sup> WCNDT, Roma. (2000).
- [9] Shark L. K., and Yu C., Automatic estimation of ultrasonic attenuation for porosity evaluation in composite materials. ROMA. 15<sup>th</sup> WCNDT. (2000).
- [10] Berthelot J.M., Matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures. 3<sup>ème</sup> édition – Paris. Editions Tec&Doc, (1999).
- [11] Morlet J, Sampling theory and propagation. NATO ASI, Vol. FI, Issues on acoustic signal/image Processing and Recognition, Ed. C.H. Springer-Verlag, (1983).
- [12] Meade M.L and Dikon C.R, Signals and Systems: models and behaviour. (2<sup>nd</sup> edition), (1991).
- [13] Quinquis A, Le traitement du signal sous Matlab. Hermès Science Publication, Paris, (2000).
- [14] Song S.P and Que P.W., Wavelet based noise suppression technique and its application to ultrasonic flaw detection. Ultrasonics, Vol. 44, No. 2. pp. 188-193. (2006).
- [15] Perrier V, Basdevant C, La décomposition en ondelettes périodiques, un outil pour l'analyse de champs inhomogènes, théorie et algorithmes. RECH ; Aersp ; nos. -3, pp. 53-67. (Mai - Juin 1989).
- [16] Poularikas A, Transforms and Applications Handbook. London: CRC Press. (January-1996).
- [17] Mallat S.G, A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet Representation. IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11, no. 7. pp. 674-693. (July 1987).
- [18] Meyer Y., Jaffard S., Rioul O., Analyse par ondelettes. Pour la Science. pp. 28-38. (1987).
- [19] Ville J, Théorie et applications de la notion de signal analytique. Laboratoire de Télécommunications de la Société Alsacienne de Constructions Mécaniques. C & T, 2e A., No 1. pp. 61-77. (1948).

- [20] Lepoutre D, Joël J, Méthodologie générale ultrasonore: application à la détection et au dimensionnement de défaut dans les matériaux composites. Edition de l'Institut des Matériaux Composites. (1987).
- [21] Mallat S, A wavelet tour of signal processing. New York: Academic Press, (1998).
- [22] Daubechies I, Orthogonal basis of compactly supported wavelets. Comm. Pure Appl. Math. Vol.41. pp. 909-996. (Nov. 1988).
- [23] Legendre S, Goyette J, Massicotte D, Ultrasonic NDE of composite material structures using wavelet coefficients. NDT & E International (34)31-37. (2001).
- [24] Misiti M et al, Wavelet TOOLBOX, For Use with MATLAB. The MATH WORKS Inc (1996).
- [25] Thevenot F et al, Caractérisation des défauts dans les matériaux composites par l'analyse morphologique de la transformée Temps- fréquence de signaux ultrasonores. Dassault aviation – Velizy- France (1997).
- [26] Yahiaoui A, Si-Chaib Med.O, Benantar M, Nour A, Contribution of the wavelet transforms to the analysis of the composites. Advanced materials for application in acoustics and vibration, Cairo, Egypt, (2009).
- [27] REZIG N, Evaluation ultrasonore des matériaux multicouches à l'aide des ondelettes et réseaux de neurones. Mémoire de Magister. Université de Boumerdès. (2007).