



**HAL**  
open science

## Identification des directions principales d'une structure composite orthotrope par méthode RIFF

Bertrand Lascoup, Frédéric Ablitzer, Charles Pezerat

► **To cite this version:**

Bertrand Lascoup, Frédéric Ablitzer, Charles Pezerat. Identification des directions principales d'une structure composite orthotrope par méthode RIFF. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01621609

**HAL Id: hal-01621609**

**<https://hal.science/hal-01621609>**

Submitted on 23 Oct 2017

**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.

# Identification des directions principales d'une structure composite orthotrope par méthode RIFF

## *Main directions identification of orthotropic composite part using Force Analysis Technique*

Bertrand Lascoup<sup>1</sup>, Frédéric Ablitzer<sup>2</sup>, Charles Pézerat<sup>2</sup>

1 : IRT Jules Verne  
Chemin du Chaffault, 44340 Bouguenais  
e-mail : [bertrand.lascoup@irt-jules-verne.fr](mailto:bertrand.lascoup@irt-jules-verne.fr)

2 : LUNAM, Université du Maine, CNRS UMR 6613, LAUM  
Avenue Olivier Messiaen, 72085 le Mans Cedex 9  
e-mail : [frederic.ablitzer@univ.lemans.fr](mailto:frederic.ablitzer@univ.lemans.fr), [charles.pezerat@univ-lemans.fr](mailto:charles.pezerat@univ-lemans.fr)

### Résumé

L'étude présentée dans ce document porte sur l'utilisation d'une méthode non destructive et sans contact permettant la détermination des directions principales d'un composite orthotrope plan. Basée sur l'exploitation de l'équation du mouvement de plaque orthotrope et sa résolution inverse, cette approche est locale. Son originalité réside que les résultats sont valables sur l'ensemble des fréquences et non pas uniquement sur les modes de résonance. L'apport de ce document est l'introduction d'une étape de recherche de l'angle des directions principales sans aucune connaissance a priori. La démarche permet donc d'une manière aveugle d'identifier non seulement les directions principales mais aussi les propriétés (modules et amortissement) du matériau.

### Abstract

The study presented in this paper deals with the use of a non-destructive and non-contact method for determining the main directions of a planar orthotropic composite. Based on the use of the equation of motion of orthotropic plate and its inverse resolution, this approach is local and can be applied to all frequencies and not only to Eigen modes. The contribution of this document is the introduction of a phase of research of the angle of the main directions without any a priori knowledge. The approach therefore blindly identifies not only the main directions but also the properties (modulus and damping) of the material.

**Mots Clés :** propriétés mécaniques, identification inverse, sans contact, mesure locale

**Keywords :** mechanical properties, inverse identification, contactless, local measurement

## 1 Introduction

La nécessité d'identifier les directions principales d'un matériau orthotrope apparaît régulièrement soit pour valider la conformité du procédé soit pour comprendre le passage des flux d'effort dans une structure. Cette identification se fait classiquement d'une manière destructive par calcination de la matrice et observation des fibres sèches. Néanmoins, le besoin d'une approche non destructive se fait particulièrement sentir lorsqu'un contrôle en sortie de chaîne de production est envisagé.

A ce besoin, on se propose d'apporter une réponse originale exploitant une simple mesure de déplacement de la plaque lors d'une sollicitation vibratoire sur une large plage de fréquences.

## 2 Principe de la méthode

### 2.1 Etat de l'art

La mesure des propriétés mécaniques d'un composite orthotrope par des méthodes vibratoires a été explorée dans les 70-80 à travers de nombreuses études (on citera par exemple Adams [1] ou Wilde [2]). Mais il s'agit dans tous les cas d'études basées sur les modes de résonance. Ces approches exploitent un bon rapport signal/bruit sur ces fréquences particulières et à partir desquelles une approche inverse permet d'extraire les propriétés de matériaux. Ces méthodes présentent l'inconvénient majeur de se limiter aux fréquences de résonance et nécessitent donc la possibilité de séparer ces modes. Cet aspect limite cette approche aux basses et moyennes fréquences. Au-delà, le recouvrement des modes rend l'exploitation des courbes FRF difficile et ne permet pas d'appliquer ces approches classiques. Par ailleurs, les mesures sont réalisées en considérant l'intégralité de la structure par l'utilisation de mesures accélérométriques ponctuelles ; les considérations locales ne sont pas possibles.

Par ailleurs des approches basées sur l'utilisation de champs virtuels [3] s'affranchissent des fréquences de résonance et permettent de travailler sur l'ensemble des données. Néanmoins, le choix du champ virtuel reste un point délicat qui conditionne la stabilité de la méthode même si des solutions sont développées pour faciliter ce choix.

Notre approche est différente car elle est purement locale, utilisable sur toutes les fréquences et il n'y a pas de choix à priori à faire par l'utilisateur.

Historiquement, la méthode RIFF (Résolution Inverse Filtrée Fenêtrée ou FAT en anglais) a été développée pour la localisation de sources vibratoires [4-6] ; elle est basée sur la mesure du champ de déplacement ( $w$ ) d'une zone plane et une résolution inverse de l'équation du mouvement de la plaque isotrope (Eq.1).

$$D\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) - \rho h \omega^2 \cdot w(x, y) = f(x, y) \quad \text{Eq 1}$$

Afin d'accéder aux dérivées partielles quatrièmes du champ de déplacement, un schéma aux différences finies est proposé : il permet de calculer les dérivées en un point donné à partir des mesures issues des points voisins. Néanmoins, cette étape induit une augmentation de l'effet des bruits de mesure et une phase de filtrage est indispensable afin de conditionner les données et conduire à des résultats valides [4-6].

Un détournement de la méthode initiale [7] a ensuite permis l'identification des propriétés matériaux isotropes en considérant des mesures issues de zones dépourvues d'efforts où  $f(x,y)=0$ . Dès lors, la résolution de l'Eq.1 est rendue possible et a permis la détermination expérimentale des propriétés locales (modules d'Young et amortissement).

Enfin, une dernière évolution a intégré la prise en considération des spécificités des plaques orthotropes dans ses axes d'orthotropie [8] en utilisant l'équation adéquate (Eq.2) et en utilisant une approche comparable sur des zones dépourvues d'efforts.

$$D_1 \frac{\partial^4 w}{\partial u^4} + (D_2 + D_4) \frac{\partial^4 w}{\partial u^2 \partial v^2} + D_3 \frac{\partial^4 w}{\partial v^4} - \rho h \omega^2 w(u, v) = f(u, v) = 0 \quad \text{Eq 2}$$

Les résultats de mesures expérimentales sur plaque composite UD ont montré que les valeurs des paramètres matériaux étaient accessibles à toutes les fréquences [8].

## 2.2 Changement de repère de travail

L'équation du mouvement en régime harmonique donnée par l'Eq 2 n'est valable que pour une plaque orthotrope dans ses axes d'orthotropie (Figure 1 à gauche) ; elle peut également s'exprimer sous forme matricielle faisant apparaître les dérivées partielles comme un opérateur  $\delta$  dans une zone où il n'y a pas d'effort extérieur :

$$\delta_{u,v} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_{24} \\ D_3 \end{bmatrix} = \rho h \omega^2 w(u, v) \quad \text{avec} \quad \delta_{u,v} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^4 w}{\partial u^4} & \frac{\partial^4 w}{\partial u^2 \partial v^2} & \frac{\partial^4 w}{\partial v^4} \end{bmatrix} \quad \text{Eq 3}$$

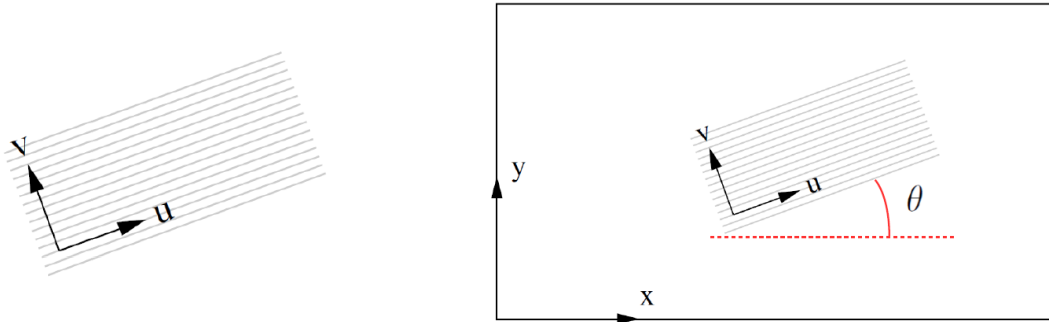


Figure 1 : (à gauche) plaque orthotrope dans ses axes d'orthotropie (u,v), (à droite) dans un repère structure x,y)

La prise en compte d'une rotation d'angle  $\theta$  entre les axes de mesures et les directions principales du matériau (Figure 1 à droite) peut être considérée en utilisant la relation suivante

$$\delta_{u,v} = P(\theta) \cdot \delta_{x,y} \quad \text{Eq 4}$$

On utilise alors une matrice de passage  $P(\theta)$  (Eq 6) et on définit un nouvel opérateur  $\delta$  contenant des termes croisés supplémentaires (Eq 5).

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos^4 \theta & \cos^2 \theta \sin^2 \theta & \sin^4 \theta \\ 4\cos^3 \theta \sin \theta & 2(\cos \theta \sin^3 \theta - \cos^3 \theta \sin \theta) & -4\cos \theta \sin^3 \theta \\ 6\cos^2 \theta \sin^2 \theta & \cos^4 \theta - 4\cos^2 \theta \sin^2 \theta + \sin^4 \theta & 6\cos^2 \theta \sin^2 \theta \\ 4\cos \theta \sin^3 \theta & 2(\cos^3 \theta \sin \theta - \cos \theta \sin^3 \theta) & -4\cos^3 \theta \sin \theta \\ \sin^4 \theta & \cos^2 \theta \sin^2 \theta & \cos^4 \theta \end{bmatrix} \quad \text{Eq 5}$$

$$\delta_{u,v} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} & \frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} & \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} & \frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} & \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \end{bmatrix} \quad \text{Eq 6}$$

L'équation du mouvement peut donc s'écrire dans un repère quelconque et

$$\delta_{u,v} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_{24} \\ D_3 \end{bmatrix} = \rho h \omega^2 w(u, v) \quad \text{devient donc} \quad P(\theta) \delta_{x,y} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_{24} \\ D_3 \end{bmatrix} = \rho h \omega^2 w(x, y) \quad \text{Eq 7}$$

### 2.3 Méthodologie pour la recherche de l'angle

D'une manière pratique, l'identification de l'angle  $\theta$  peut être réalisée à partir du champ de déplacement et en utilisant l'Eq 7 pour chaque fréquence de l'étude. L'idée est de tester tous les angles possibles  $[0;90^\circ]$  et de faire une résolution RIFF orthotrope [8]. La résolution de l'Eq7 est réalisée par une minimisation aux moindres carrés et le résidu constitue un indicateur de la pertinence des jeux de données.

Des essais préliminaires de résolution à partir de données simulées ont montré que le choix de l'angle  $\theta$  est d'ordre 1 par rapport aux paramètres de filtrage de données et que quel que soit le mode de filtrage, le résidu sera minimisé pour les valeurs d'angles la plus réaliste.

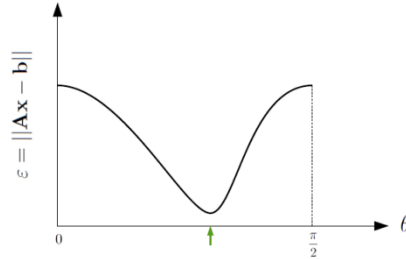


Figure 2 : représentation de l'évolution du résidu de calcul en fonction de l'angle de rotation pour une fréquence donnée

Les grandes étapes de la méthodologie sont donc pour chaque fréquence :

- Les dérivées sont déterminées à partir des points mesurés et du schéma aux différences finies
- La valeur de l'angle  $\theta$  est choisie dans une plage de recherche  $[0;90]$
- L'équation est résolue (moindre carrés) afin de déterminer les paramètres de rigidité
- Le résidu du calcul est extrait
- la valeur de l'angle est déterminée par le résidu le plus faible

### 2.4 Schéma compact pour les différences finies

La résolution de l'équation précédente implique la détermination de dérivées partielles supplémentaires par rapport à l'approche RIFF destinée à la détermination des propriétés matériaux pour plaque orthotrope [8]. Le schéma aux différences finies est donné par l'Eq 8.

nouvelles dérivées  
à approximer

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \approx \frac{w_{i+4,j} - 4w_{i+2,j} + 6w_{i,j} - 4w_{i-2,j} + w_{i-4,j}}{16\Delta_x^4}$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} \approx \frac{w_{i+3,j+1} - w_{i+3,j-1} - 3w_{i+1,j+1} + 3w_{i+1,j-1} + 3w_{i-1,j+1} - 3w_{i-1,j-1} - w_{i-3,j+1} - w_{i-3,j-1}}{16\Delta_x^3 \Delta_y}$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \approx \frac{w_{i+2,j+2} - 2w_{i+2,j} + w_{i+2,j-2} - 2w_{i,j+2} + 4w_{i,j} - 2w_{i,j-2} + w_{i-2,j+2} - 2w_{i-2,j} + w_{i-2,j-2}}{16\Delta_x^2 \Delta_y^2}$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} \approx \frac{w_{i+1,j+3} - 3w_{i+1,j+1} + 3w_{i+1,j-1} - w_{i+1,j-3} - w_{i-1,j+3} + 3w_{i-1,j+1} - 3w_{i-1,j-1} + w_{i-1,j-3}}{16\Delta_x \Delta_y^3}$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \approx \frac{w_{i,j+4} - 4w_{i,j+2} + 6w_{i,j} - 4w_{i,j-2} + w_{i,j-4}}{16\Delta_y^4}$$

Dérivées à approximer par différences finies

Eq 8

Par rapport aux 3 dérivées classiquement utilisées ( $\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}$ ,  $\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}$  et  $\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2}$ ) deux nouvelles dérivées quatrième doivent être exprimées impliquant une modification des points de mesures indispensables.

Alors que le schéma RIFF classique nécessite **13 points** [8], l'intégration de l'angle de rotation nécessite les **13 points** initiaux plus **12 points** supplémentaires

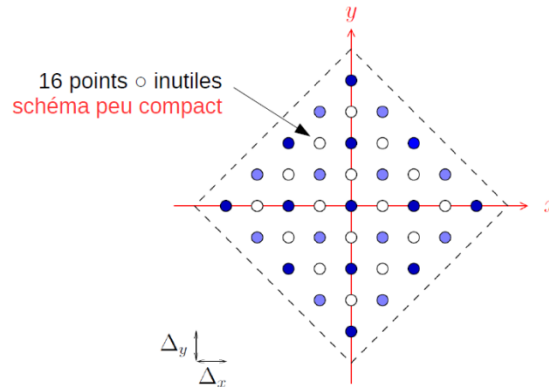


Figure 3 : schéma RIFF intégrant l'angle de rotation

Par ailleurs, la répartition des points de mesure nécessaires implique que 16 points de mesure ne sont pas utilisés (Figure 3) rendant le schéma gourmand en mesure et peu performant.

Une modification du repère de mesure permet d'exploiter la totalité des points de mesure et de rendre le schéma compact. La Figure 4 permet d'avoir un schéma compact.

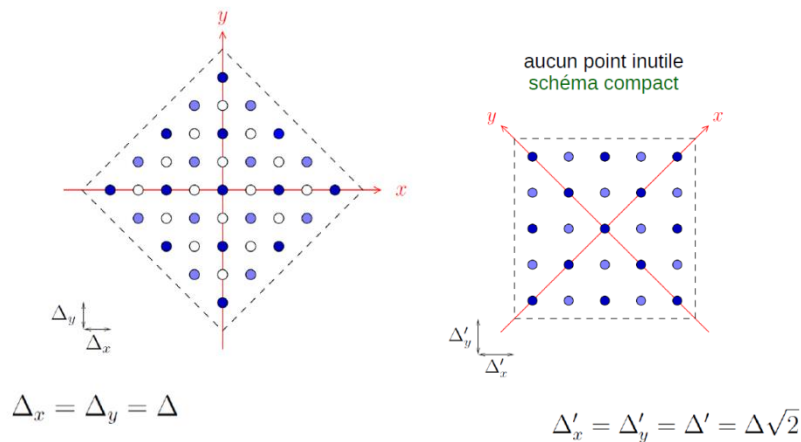


Figure 4 : modification du repère de mesure pour un schéma compact

### 3 Validation expérimentale sur plaque UD

#### 3.1 Matériau modèle

Une plaque monolithique a été élaborée au laboratoire à partir de fibres de verre UD et de résine vinylester en utilisant un procédé LRI (Figure 5).



Figure 5 : production de plaque UD en LRI

Les 8 plis de verre UD d'un grammage de 300g/m<sup>2</sup> sont positionnés à 0° et la migration de résine vinylester diffuse dans la préforme par un tirage de vide à travers un drainant (Liquid Resin Infusion). Ce procédé permet d'atteindre des taux de fibres important (TVF=50%).

La théorie des stratifiés permet d'estimer les modules du composite ( $E_x= 30-35$  GPa et  $E_y= 10-15$  GPa).

### 3.2 Mesures RIFF dans les axes d'orthotropie

Les panneaux sont suspendus a un portique par des liens élastiques afin de se rapprocher d'un mode « libre-libre » comme le présente la figure 6. Les efforts d'excitation sont générés par un pot vibrant et sont composés d'un sinus glissant allant de 100Hz à 10kHz avec une modulation d'amplitude permettant d'avoir une réponse satisfaisante sur tout le domaine fréquentiel

Les mesures consistent à la détermination des champs de déplacements de point d'un quadrillage de la zone et un vibromètre laser à balayage effectue les mesures. Les champs de déplacement sont exprimés dans leur forme complexe. Une synchronisation entre l'excitation et la mesure s'effectue afin d'avoir une référence de phase.

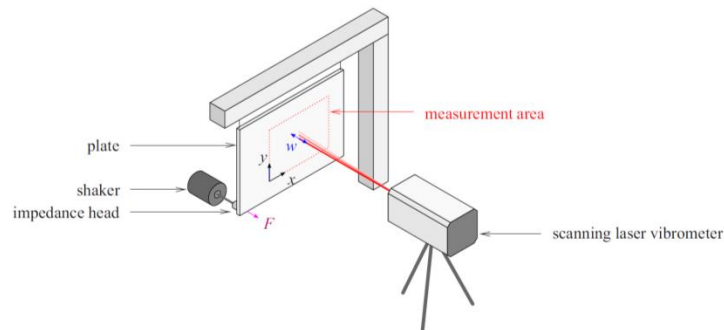


Figure 6 : évolution des modules et des coefficients d'amortissement en fonction de la fréquence

Des mesures RIFF sans prise en compte de l'angle ont été menées sur ce matériau avec un maillage de 55x31 points représentant une surface de 0.24m x 0.13m.

La Figure 7 donne l'évolution des modules d'Young en X et Y (gauche) et du coefficient d'amortissement en X et Y (droite).

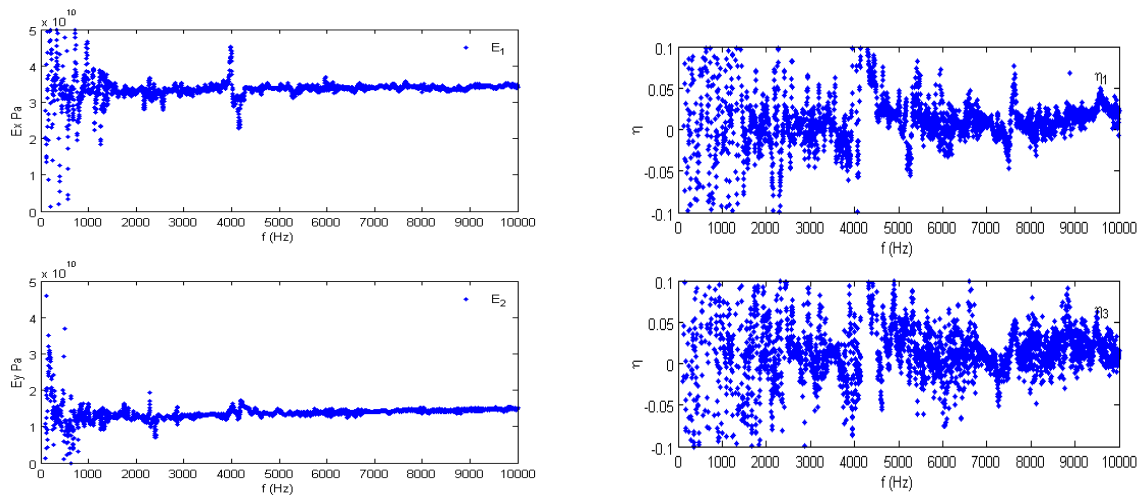


Figure 7 : évolution des modules et des coefficients d’amortissement en fonction de la fréquence

Les valeurs et les évolutions des modules sur la plage de fréquence est cohérente avec la théorie classique. Le domaine de validité fréquentiel s’étend de 1kHz jusqu’à 10kHz. Les basses fréquences ne sont pas accessibles du fait de la taille de la zone de mesure et des périodes spatiales des déformées à ces fréquences. Autour de 4kHz, la singularité est attribuée à un phénomène induit par le dispositif expérimental de mesure (liaison pot vibrant/plaque).

Pour la détermination de  $E_y$ , l’accroissement lent n'a pas de sens physique mais est dû à un biais de mesure engendré par un maillage et une zone de mesure non adapté [8].

Le point négatif est la détermination des coefficients d’amortissement qui est extrêmement bruitée ; les valeurs sont trop proches de 0 et il devient difficile d’extraire les données exploitables pour une identification correcte.

### 3.3 Mesures RIFF sans prise en compte de l’angle hors des axes d’orthotropie

La Figure 8 montre l’inclinaison entre l’axe principal du matériau et l’orientation de la zone de prise de mesure. Dans cette série de mesure,  $21^\circ$  sépare les 2 référentiels.

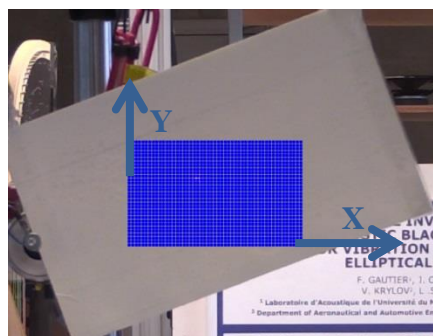


Figure 8 : essai Off-axis sur UD verre/vinylester

Les mêmes conditions expérimentales ont été mises en œuvre avec le maillage comportant 51 x 31 points sur une surface de 0.17m x 0.10m. Cette surface est assez limitée à cause de la taille initiale de la plaque et de l’inclinaison qui la limite encore plus. Le point d’excitation est positionné sur le côté de la zone de mesure au centre du côté gauche.

Une application de la méthode RIFF sans prendre en compte cet angle aboutit à la détermination des modules apparents présentés par la Figure 9.



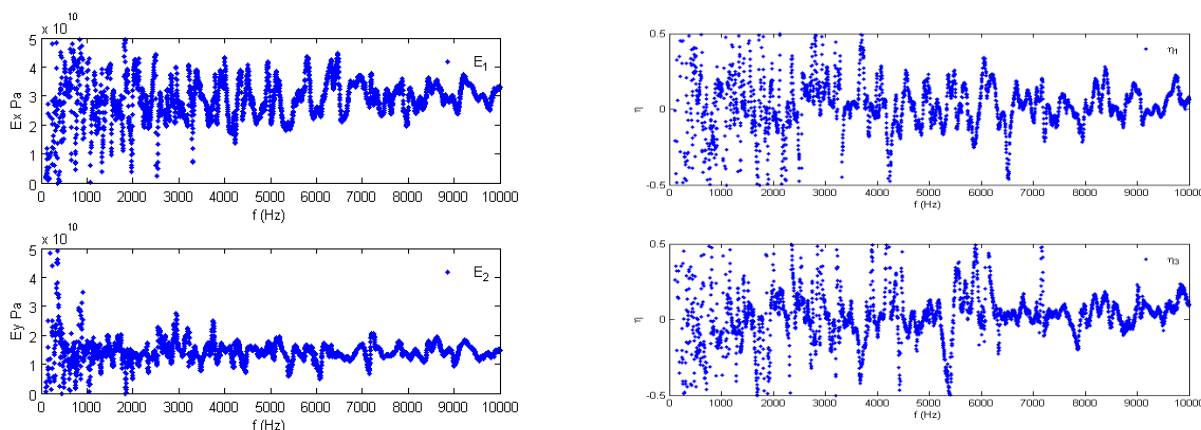


Figure 9 : évolution des modules et des coefficients d'amortissement off-axis ( $21^\circ$ ) en fonction de la fréquence

L'évolution des modules montre une allure très perturbée. Le module  $E_x$  varie entre 20GPa et 40GPa et  $E_y$  varie entre 10 et 20GPa.

Cette dispersion est attribuée à des phénomènes de cisaillement dans le plan que le modèle utilisé ne prend pas en compte.

Pour ce qui est du coefficient d'amortissement, la dispersion est encore plus marquée que lors des essais dans les axes d'orthotropie car elle cumule les difficultés liées à la proximité de 0 et des effets dissipatifs engendrés par les effets de cisaillement dans le plan.

### 3.4 Recherche des directions principales

A partir du jeu de données expérimentales acquises précédemment, l'approche de recherche de l'angle entre la direction principale de prise de mesure et la direction principale du matériau est appliquée. Dans cette partie, l'objectif est uniquement d'identifier la coïncidence entre les deux directions principales : l'étape d'identification des propriétés n'est pas présentée ici.

Le domaine fréquentiel d'intérêt se limite aux hautes fréquences afin de se positionner dans des conditions où les phases de filtrage sont performantes [8].

Les résultats sont présentés par la Figure 10 qui regroupe les valeurs d'angle identifiées pour l'orientation des deux directions principales du composite.

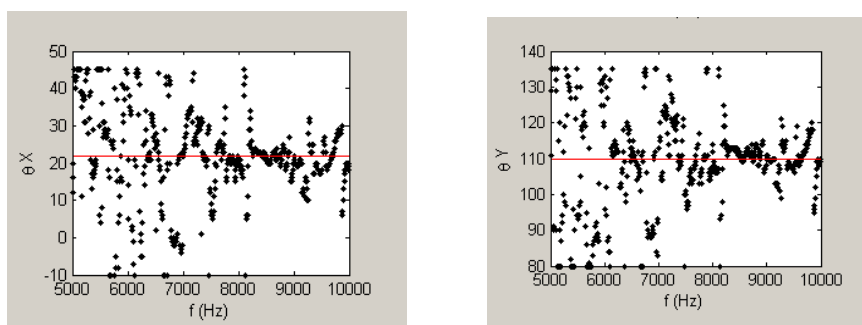


Figure 10 : résultats de la recherche d'angle sur UD hors de ses axes d'orthotropie

On constate que seules les hautes fréquences tendent vers des valeurs satisfaisantes. Néanmoins, une simple moyenne ou une décomposition en population par histogramme permet de faire émerger les valeurs escomptées.

Bien que bruités, ces résultats sont assez encourageants ; ils préfigurent le potentiel de détection de la méthode. Un effort supplémentaire doit être cependant fait pour identifier les paramètres expérimentaux pour cibler les fréquences optimales de mesure qui conduisent à coup sûr à une identification pertinente.

#### 4 Exploitation sur structure complexe

Lors de la mise en forme par thermocompression de structure à fibres mi-longues, une réorganisation des fibres a lieu lors de la fermeture du moule. Il convient alors de s'assurer de la validité de la morphologie de la pièce par rapport à ce qui a été prévu.

On se propose dans cette partie de valider l'orientation principale des fibres sur une pièce complexe constituée de fibres mi-longues de carbone (Figure 11). D'une manière destructive (digestion acide et observation du squelette fibreux), il a été montré que les fibres se sont réalignées dans le sens de la grande longueur de la pièce.

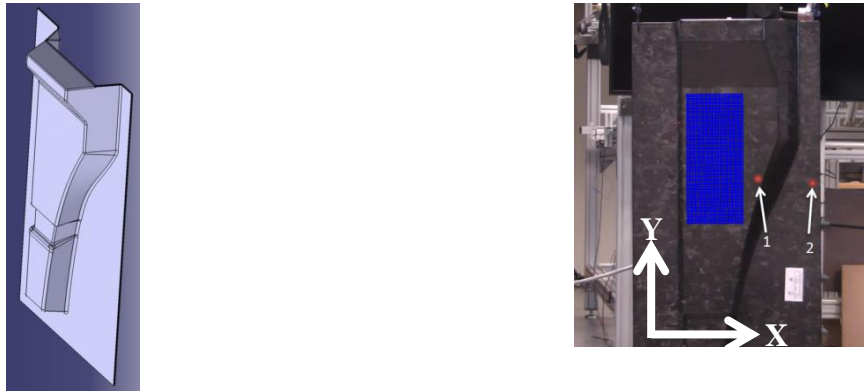


Figure 11 : démonstrateur (d) et zone de mesure et d'excitation (g)

L'utilisation de différents points d'excitation (localisation 1 ou 2) a permis de mettre en évidence la flexibilité de la méthode car les résultats restent pertinents malgré l'éloignement excitation-zone de mesure. Néanmoins, le point d'excitation 1 permet une meilleure identification et les résultats ci-dessous seront issus de cette configuration.

La surface de mesure est rectangulaire, orientée verticalement définissant les directions X et Y. Les dimensions de la zone de mesure sont 11.2cm (31 points) selon X et 26.5cm (71 points) selon Y.

La Figure 12 sur cette zone confirme les orientations déterminées par des analyses destructives.

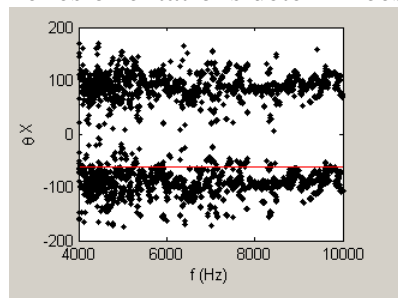


Figure 12 : identification des angles des directions principales à partir de l'excitation au point 1

La direction principale se situe à  $+90^\circ$  ou  $-90^\circ$  par rapport à la direction X de la mesure. On aboutit donc à la confirmation que les fibres se sont donc écoulées et réalignées dans le sens de la grande longueur de la pièce (i.e. verticalement pour la mesure).

#### 5 Conclusions

La méthode proposée ici permet d'identifier les directions principales d'une partie plane de structure composée d'un matériau orthotrope d'une manière non destructive et sans contact. L'approche nécessite une étape de filtrage des données qui permet une résolution inverse de l'équation du mouvement en testant tous les angles possibles entre la direction de mesure et la direction

principale. L'angle qui permet une résolution engendrant le plus faible résidu correspond simplement à la valeur indiquant la direction principale. Des lors, il devient également possible de déterminer les valeurs des paramètres mécaniques caractérisant le matériau dans ses axes d'orthotropie à partir d'une mesure off-axis.

### Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet COPERSIM-Vibro. Les auteurs tiennent à remercier les membres industriels et académiques de ce projet porté par l'IRT Jules Verne, respectivement PSA, Renault, Plastic Omnium, Solvay, CETIM ainsi que l'Etat français pour les aides d'Etat dont le projet a bénéficié au titre du Programme d'Investissements d'Avenir portant la référence ANR-10-AIRT-02.

### Références

- [1] R.D. Adams, D. G. C. Bacon, Measurement of the flexural damping capacity and dynamic Young's modulus of metals and reinforced plastics. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, v. 6, p. 27-41, 1973.
- [2] W. P. Wilde, H. SOL, Determination of material constants using experimental free vibration analysis on anisotropic plates. *Experimental stress analysis*, p. 207-214, 1986.
- [3] A. Giraudeau, F. Pierron, Simultaneous identification of stiffness and damping properties of isotropic materials from forced vibrating plates, *Compte Rendus Mécaniques*, (2003) 259-264.
- [4] C. Pezerat, J. L. Guyader, Inverse methods for localization of external sources exciting a beam, *Acta Acustica* 3 (1995)1–10.
- [5] C. Pezerat, J. L. Guyader, Force analysis technique: reconstruction of force distribution on plates, *Acustica* 86 (2000)322–332.
- [6] C. Pezerat, J. L. Guyader, Identification of vibration sources, *Applied Acoustics* 61(2000)309–324.
- [7] F. Ablitzer, C. Pézerat, Génevaux J.M., Bégué J., Identification of stiffness and damping properties of plates. *Journal of Sound and Vibration*, n. 333, p. 2454-2468, 2014.
- [8] B. Lascoup, T. Wassereau, F. Ablitzer, C. Pézerat, identification des propriétés mécaniques d'un composite par méthode RIFF, *Journées Nationale sur les composites* 19, 29-30 juin – 1 juillet 2015, Lyon, France