



HAL
open science

Détermination de propriétés constitutives de pièces à géométrie complexe en matériaux composites par méthode mixte numérique/expérimentale dynamique non-invasive.

Romain Viala, Vincent Placet, Scott Cogan

► To cite this version:

Romain Viala, Vincent Placet, Scott Cogan. Détermination de propriétés constitutives de pièces à géométrie complexe en matériaux composites par méthode mixte numérique/expérimentale dynamique non-invasive.. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01621601v2

HAL Id: hal-01621601

<https://hal.science/hal-01621601v2>

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.

Détermination de propriétés constitutives de pièces à géométrie complexe en matériaux composites par méthode mixte numérique/expérimentale dynamique non-invasive

Determination of the constitutive properties of complex-shaped parts made of composite materials using a numerical-experimental non-invasive dynamic method

R. VIALA, V. PLACET et S. COGAN

Univ. Bourgogne Franche-Comté
FEMTO-ST Institute
CNRS/UFC/ENSMM/UTBM
Department of Applied Mechanics
25000 BESANÇON-FR
e-mail : romain.viala@univ-fcomte.fr

Résumé

L'évolution et la diversification des procédés de fabrication et de mise en forme des matériaux composites permettent d'accéder à des objets ou des pièces de structure dont la géométrie est de plus en plus complexe. La détermination de leurs propriétés constitutives est généralement destructive et fastidieuse. L'utilisation de méthodes d'identification mixtes expérimentale/numérique basées sur des réponses modales expérimentales et sur un modèle numérique représente une méthode puissante, précise et non-invasive pour identifier plusieurs paramètres constitutifs inconnus à partir d'un seul essai. Dans cette étude, cette méthode est adaptée pour des pièces en composite à géométrie complexe dont les propriétés finales dépendent étroitement du procédé d'élaboration. Les résultats montrent qu'il est possible d'identifier simultanément plusieurs propriétés, dont le nombre et la nature dépendent de la pièce étudiée, du matériau et de la bande de fréquence de sollicitation. À partir d'un seul essai expérimental et de son exploitation, jusqu'à cinq rigidités et trois facteurs de pertes peuvent être identifiés.

Abstract

The evolution and diversification of manufacturing processes of composite materials has yield to more and more complex geometries. The determination of their constitutive properties is generally long and destructive. The utilization of mixed experimental/numerical methods based on vibratory responses and finite element model is a powerful, precise and non-invasive method to identify numerous constitutive parameters in one experiment. In this study, this method is applied to complex shape composite parts whom final properties are strongly linked to their manufacturing process. Results show that it is possible to identify simultaneously many properties, whom number and nature depend of the studied part shape, its material and the considered frequency band. Up to five rigidities and three loss factors can be identified.

Mots Clés : Identification inverse, Pièces à forme complexe, Propriétés élastiques anisotropes, Vibrométrie laser 3D

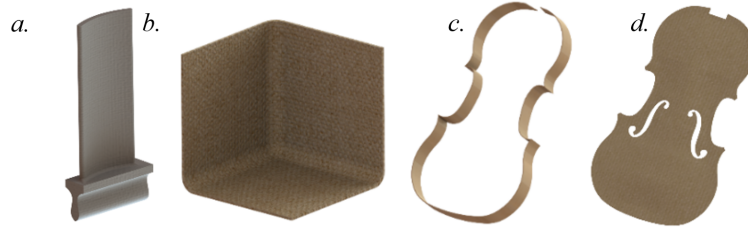
Keywords : Inverse identification, Complex shaped parts, Anisotropic elastic properties, 3D laser vibrometry

1. Introduction

L'utilisation de matériaux composites dans les domaines académiques et industriels n'a cessé d'augmenter depuis plusieurs décennies. De nombreuses méthodes de caractérisation, étudiant le comportement élastique et la durabilité de ces matériaux ont été développées. La grande variété comportementale de ce type de matériau, due, entre autres, aux procédés de fabrication, aux constituants utilisés et à leur architecturation au sein des pièces, a conduit au développement de méthodes de caractérisation de plus en plus sophistiquées. Des méthodes directes et indirectes peuvent être utilisées. Les premières estiment directement les propriétés recherchées à partir d'expériences et de principes fondamentaux de la mécanique du solide. Les secondes, appelées méthodes inverses, sont basées à la fois sur l'expérimental, la modélisation et l'utilisation d'algorithmes de minimisation qui permettent d'identifier

des propriétés dont la nature et le nombre varient en fonction du matériau ou de la configuration d'essai. Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients et certaines ne sont pas nécessairement adaptées à l'étude de formes et de matériaux complexes (cf fig.1). Les méthodes directes,

Fig. 1. Pièces composites à géométrie complexe. a. Aube de turbine en composite à matrice céramique, b. pièce "coin de valise" en composite biosourcé, c. éclisses de violon thermoformées en bois, d. table de violon en composite biosourcé thermocompressé



généralement destructives, ou du moins nécessitant un contact entre l'équipement et l'échantillon, ont été historiquement utilisées pour mesurer les propriétés élastiques de nombreux matériaux. Celles-ci sont généralement considérées comme des méthodes de référence [1]. La demande croissante pour des méthodes non destructives, ainsi que leur facilité de mise en oeuvre a conduit à l'utilisation de techniques sophistiquées, telles que celles permettant la mesure de champs cinématiques, couramment utilisées pour des chargements quasi-statiques ([2],[3]). Les méthodes indirectes, basées sur une association de méthodes expérimentales et numériques (recalage de modèles éléments finis (Finite Element Model Updating (FEMU) par exemple), peuvent être considérées comme particulièrement performantes et prometteuses, en particulier pour les matériaux présentant un comportement et/ou une forme complexes. Généralement, cette méthode est non-invasive, rapide et simple à mettre en oeuvre. Elle implique une préparation des échantillons réduite en comparaison aux méthodes traditionnelles nécessitant des échantillons calibrés. Les champs vibratoires sur lesquels se basent ces méthodes sollicitent la matière dans des domaines de déformation très faibles, et ces mêmes champs, associés à l'analyse modale, sont plus représentatifs d'un comportement global, en comparaison d'autres essais observant des phénomènes locaux. Cette méthode présente par ailleurs l'avantage de permettre l'identification de plusieurs paramètres simultanément (rigidités et facteurs de perte) à partir d'un seul essai. Le nombre de ces paramètres est toutefois dépendant du matériau, de la géométrie et de la richesse des informations acquises expérimentalement. De plus, cette méthode permet parfois de remonter à des propriétés habituellement difficiles à mesurer et d'évaluer la dépendance à la température ou à l'humidité relative de matériaux.

Depuis le début des années 80, des méthodes mixtes basées sur des modèles numériques ont été développées [4], et une méthode faisant appel à un modèle mathématique a été appliquée sur de nombreuses plaques anisotropes [5] pour estimer les facteurs de pertes de plaques composites par des méthodes vibratoires. Plus récemment, l'efficacité du recalage de modèle proposé dans [6] a été étudiée dans le cas de matériaux multi-couches ainsi que l'impact de l'orientation des plis sur les propriétés homogénéisées de ces plaques [7]. De plus, une analyse de propagation d'incertitudes a également été effectuée afin de valider la méthode en présence d'incertitudes (dimensionnelles, massiques). Depuis, de nombreuses études concernant des structures sandwichs ont été effectuées en utilisant cette méthode, et ont été validées pour différents rapport de rigidités entre les ames et les peaux des composites considérés ([8], [9], [10]). D'autres types de matériaux ont été étudiés, tels que des poutres en bois [11], des plaques de matériaux viscoélastiques [12] et des tubes en composites [13]. Pour finir, cette méthode a été utilisée pour évaluer l'influence de la teneur en eau du bois de lutherie (épicéa) sur ses propriétés élastiques [14]. Une méthode de minimisation stochastique a été proposée ([15, 16]), basée sur une distribution probabiliste des propriétés et non une valeur déterministe. Toutefois cette opération est très coûteuse en temps de calcul. Un ensemble d'applications récentes de cette méthode

est présenté dans [17].

La littérature montre donc que cette méthode mixte expérimentale/numérique a été utilisée avec succès pour caractériser le comportement complexe de matériaux composites et sandwichs. Les études ont été menées à l'échelle de géométries d'éprouvettes ou pièces relativement simples, incluant principalement des plaques et des pièces à symétrie de révolution. Le passage à des géométries plus complexes (3D quelconques) requiert d'accéder à la mesure des champs de champs dans les différentes directions matérielles de la pièce étudiée. Les évolutions technologiques récentes effectuées dans le domaine de la vibrométrie laser 3D permettent donc d'envisager l'application de méthodes mixtes expérimentales/numériques à des géométries de pièces complexes.

L'étude proposée ici repose sur l'utilisation d'un modèle numérique des pièces en composite à géométrie complexe, d'un dispositif expérimental constitué d'un système d'excitation acoustique sans-contact (haut-parleur) et d'un vibromètre laser 3D à effet Doppler. La vibrométrie laser permet de mesurer, via les vitesses dans les différentes directions matérielles, la réponse dynamique complète de l'objet. Les données expérimentales issues de ces mesures de champs, réalisées à différentes fréquences de sollicitation, sont riches et détaillées. La diversité des modes de sollicitation ainsi que l'hétérogénéité des champs de déformation permettent, en particulier, d'activer simultanément plusieurs paramètres de la loi de comportement, rendant possible leur identification à partir d'un seul essai. Ceci requiert néanmoins une méthode d'identification efficace. Les paramètres élastiques sont identifiés en minimisant la différence entre les fréquences propres de la base modale mesurée et celle issue de simulations numériques par la méthode des éléments finis (MEF). Une étude de sensibilité permet préalablement de déterminer les paramètres élastiques les plus influents sur la réponse modale, et par conséquent les paramètres identifiables de manière robuste par minimisation. Ces paramètres élastiques sélectionnés sont alors identifiés à l'aide d'une méthode de convergence rapide. La taille de l'espace à sonder est préalablement réduite sur la base de connaissances sur les matériaux testés. L'ensemble de ces actions permet d'obtenir un problème inverse mieux posé. Les facteurs de perte sont quant à eux déterminés directement à l'aide de l'amortissement modal (à partir des modes sollicitant une seule direction matérielle). Les pièces étudiées sont des tables d'harmonie de violon, traditionnellement sculptées en bois, et présentant une forme complexe. Deux différents cas sont considérés :

- le premier échantillon est une table d'harmonie réalisée en composite lin/époxy. Le but de ce premier cas de figure est de remonter aux propriétés élastiques du matériau constituant cette pièce, considérant le fait que les propriétés du matériau dépendent étroitement du procédé de fabrication.
- le second échantillon est aussi une table d'harmonie de violon, faite de bois saturé en humidité et cintré à chaud afin d'obtenir la forme désirée. Le but de ce second cas est d'évaluer l'impact de la procédure de mise en forme sur les propriétés du bois par rapport à son état d'origine sous forme de plaques.

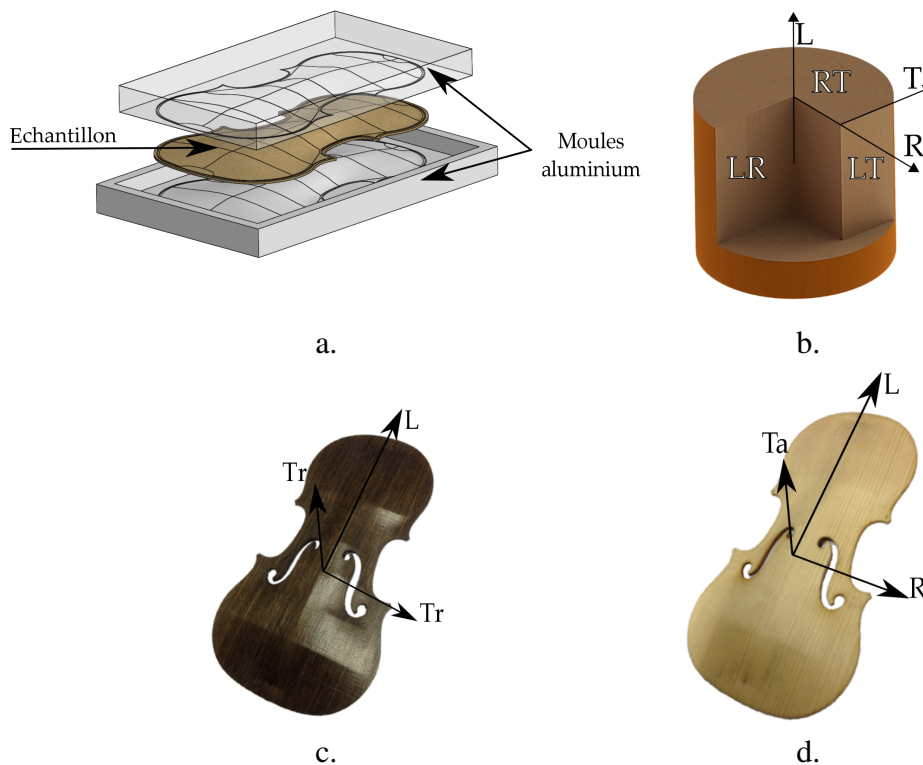
2. Matériel et méthodes

2.1. Matériaux et échantillons

Les tables en composite ont été fabriquées par thermo-compression de 16 plis unidirectionnels de flaxpreg T-UD, une gamme de flaxtapeTM pré-imprégné, fourni par la société LINEO®. Le grammage est de 220 g/m², dont 110 g/m² de fibre de lin, la référence de la résine utilisée est XB3515 et celle du durcisseur Aradur®5021. La méthode de fabrication, schématisée fig. 2a. utilise un moule en aluminium recouvert de téflon. Le moule est placé sur des plateaux chauffants et une pression est effectuée sur le plateau supérieur. Le flaxpreg T-UD est comprimé à 130°C et 3 Bars. La fraction massique de fibre est de l'ordre de 50%. Le bois est cintré à l'intérieur du moule, avec une pression de 2 bars. Des écarteurs d'épaisseur 2mm sont ajoutés pour éviter la compression des parois cellulaires. Le bois utilisé est du bois de lutherie, sélectionné soigneusement pour son utilisation en facture instrumentale, dont les qualités peuvent être liées à l'absence de défauts macroscopiques (nœuds), l'homogénéité des

cernes d'accroissement naturels et la rectitude de la fibre, ce qui conduit généralement à un rapport élevé entre la rigidité et la masse volumique. Les échantillons de bois ont été fournis par la société "Le bois de lutherie", une scierie spécialisée dans ce type de bois basée à Fertans. L'orientation du bois à l'intérieur du tronc est donnée fig. 2b., les morceaux utilisés sont prélevés dans le plan LR puis calibrés à une épaisseur de 2 mm. Les échantillons sont prélevés par découpe laser sur un équipement TROTEC®speed300 équipé d'un laser CO₂ La fig. 2c. représente l'échantillon en fibre de lin, et d. celui en bois cintré. L'orientation respective de chaque matériau est fig. 2c. et d. sera utilisée par la suite ; L : longitudinal, R : radial, Ta : tangentiel et Tr : transverse. Les échantillons parallélépipédiques de dimensions 70x4.5x2 mm sont prélevés par découpe laser sur les parties plates des plaques fabriquées.

Fig. 2. a. Schéma de fabrication pour les deux échantillons, b. repère dans le tronc du bois utilisé, c. repère du matériau composite, d. orientation du bois cintré. (L : longitudinal, R : Radial, Tr : transverse, Ta : tangentiel)



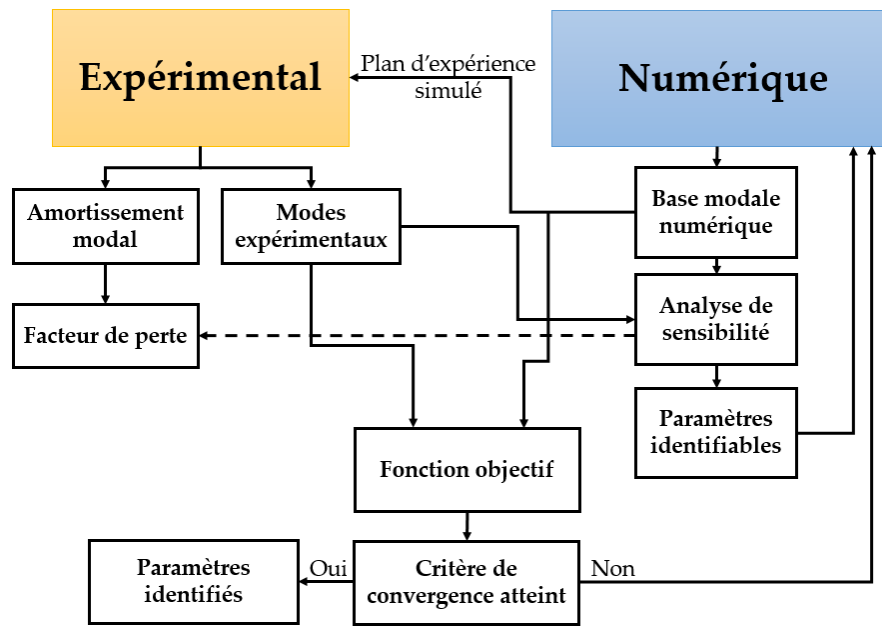
2.1.1. Évaluation de la densité

La masse volumique des échantillons a été évaluée soit par la méthode de la poussée d'archimède, soit en mesurant l'épaisseur finale de l'échantillon, et en utilisant le volume correspondant à une telle épaisseur de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Les masses de chaque échantillon ont été mesurées sur une balance KERN®770 avec une précision de 0.1 mg

2.2. Méthode mixte expérimentale/numérique

Dans cette partie, la méthode utilisée est schématisée en fig. 3 et décrite, la description est scindée en deux parties principales correspondant aux deux pans de la méthode : la mesure expérimentale et la modélisation numérique.

Fig. 3. Schéma itératif représentant les étapes de la méthode d'identification paramétrique



2.2.1. Mesure de champs vibratoires

Le montage expérimental est représenté fig. 4a., les mesures sont effectuées avec un vibromètre 3D PSV-500 de marque Polytec. La technique de mesure utilisée est l'effet Doppler. La distance d'utilisation pour cette étude est de 1 m et la résolution spatiale du point de mesure de l'ordre de 100 μm . La résolution de mesure du déplacement est de 10 nm par racine de Hertz. La durée d'une mesure varie en fonction du nombre de points et de la précision désirée. Dans notre cas, 800 points de mesure sont utilisés, ce qui conduit à une durée d'essai de l'ordre d'une heure. L'excitation utilisée, inspirée de [18] consiste en un haut-parleur de marque MONACOR® produisant une excitation acoustique sur une zone de la structure définie afin de solliciter le maximum de modes. Le calcul des bases modales expérimentales est effectué par un logiciel développé au laboratoire, MODAN®. Les 3 degrés de liberté, en chaque point, sont mesurés. L'évaluation de l'amortissement modal de chaque mode permet l'identification des facteurs de perte directionnels du matériau, ceux-ci étant égaux au double de l'amortissement modal. Les champs de déformation sont mesurés. Ils conduisent à une évaluation, dans plusieurs directions des déformations subies par le matériau. Dans cette étude, les déformations sont de l'ordre de la nanodéformation, et du nanoradian.

2.2.2. Modélisation

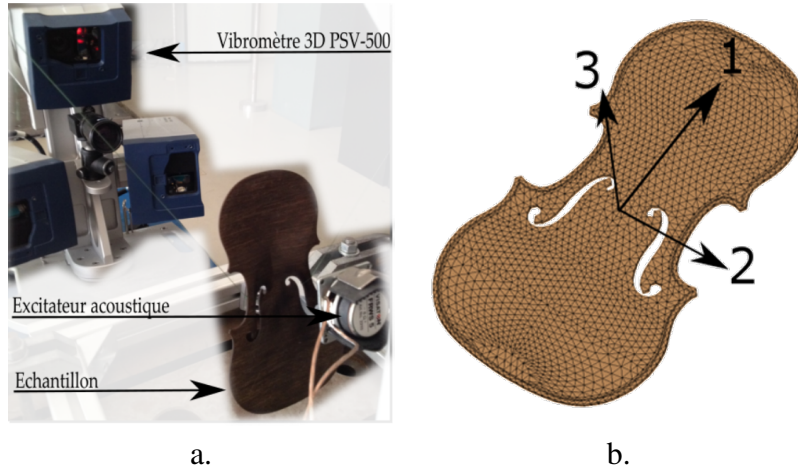
Modèle de comportement du matériau

La loi de comportement macroscopique implémentée dans le modèle numérique utilise la mécanique des milieux continus, l'hypothèse des faibles déformations et l'élasticité linéaire. Les matériaux étudiés sont ainsi supposés, à cette échelle, homogènes. La loi de comportement élastique linéaire est déduite de l'équation d'état d'un solide dont le potentiel d'état de l'énergie libre spécifique est utilisé pour la caractérisation mécanique isotherme, ce qui conduit aux équations d'état élastiques et à la relation :

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{S}}^{-1} : \underline{\underline{\epsilon}}, \quad \underline{\underline{\epsilon}} = \underline{\underline{S}} : \underline{\underline{\sigma}}, \quad \underline{\underline{H}} = \underline{\underline{S}}^{-1} \quad (\text{Eq. 1})$$

où $\underline{\underline{H}}$ est le tenseur d'ordre 4 des rigidités élastiques, ":" est le produit matriciel de Hadamard, $\underline{\underline{\sigma}}$ le tenseur des contraintes de Cauchy, $\underline{\underline{\epsilon}}$ le tenseur des déformations, $\underline{\underline{S}}$ le tenseur de la complaisance

Fig. 4. a. Montage expérimental utilisé, b. modèle de l'échantillon par méthode des éléments finis et repère



élastique. La complaisance élastique $\underline{\underline{S}}$ dépend des caractéristiques élastiques du matériau. Par la suite, E_i représente le module d'Young dans la direction i , ν_{ij} le coefficient de Poisson dans les directions i, j et G_{ij} le module de cisaillement dans les plans i, j . En se basant sur les symétries matérielles, le comportement élastique peut être complètement défini par deux (E et ν ou $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$), cinq ($E_1, E_2, G_{12}, \nu_{22}$ et ν_{12}) et neuf ($E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{23}, G_{31}, \nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{31}$) paramètres, respectivement pour des matériaux isotrope, isotrope transverse et orthotrope. Le cas le plus complexe, orthotrope est décrit par l'Eq. 2, celui-ci concerne le bois. Dans le cas de l'anisotropie transverse, concernant le composite, les indices 2 et 3 sont équivalents. La forme généralisée de la matrice d'élasticité, pour un matériau présentant trois axes de symétrie est donnée par :

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{-\nu_{13}}{E_1} & & & \\ \frac{-\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & & & \\ \frac{-\nu_{31}}{E_3} & \frac{-\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & & & \\ & & & \frac{1}{G_{23}} & & \\ & & & & \frac{1}{G_{31}} & \\ & & & & & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 2})$$

Modèle de configuration d'essai

Le comportement vibratoire est modélisé par un système vibratoire non amorti, sans pré-contraintes avec conditions aux limites libres.

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (\text{Eq. 3})$$

$[M]$ représente la matrice de masse du système, $[K]$ la matrice de raideur. $\ddot{x}(t)$ et $x(t)$ représentent respectivement les vecteurs d'accélération et de déplacement en fonction du temps. $f(t)$ correspond au vecteur des forces appliquées au système. Dans le domaine fréquentiel, l'équation précédente conduit, par transformée de Fourier à

$$[-[M]\omega^2 + [K]] \{X(\omega)\} = \{F(\omega)\} \quad (\text{Eq. 4})$$

ω représente la pulsation, $\{X(\omega)\}$ les vecteurs de déplacement et $\{F(\omega)\}$ le vecteur force. En considérant les vibrations libres du système ($\{f(t)\} = 0$) cela conduit à :

$$[[K] - [\Omega][M]] [\Phi] = 0 \quad (\text{Eq. 5})$$

où $[\Omega]$ est la matrice diagonale des valeurs propres, $[\Phi]$ est la matrice des vecteurs propres où chaque colonne correspond à un vecteur propre $\{\Phi_j\}$ pour chaque mode j .

Ces modèles (matériau et vibratoire) sont implémentés dans un modèle numérique par la méthode des éléments finis.

2.2.3. Conception du modèle éléments finis

La géométrie des pièces a été construite en utilisant le logiciel SOLIDWORKS®, un logiciel de conception assistée par ordinateur de la société Dassault Systèmes puis exportée au format parasolid dans le logiciel PATRAN®, un pré-processeur du solveur NASTRAN®, développé par la société MSC Softwares. Des éléments tétraédriques à interpolation quadratique ont été utilisés, garantissant la présence d'un noeud dans l'épaisseur des pièces. La taille du maillage est adaptée en fonction du temps de calcul et d'un critère de convergence du maillage, définissant une taille maximum d'éléments afin que l'erreur due à la discrétisation soit minimisée. Le critère nécessitant 6 degrés de liberté par longueur d'onde est respecté. La méthode par éléments finis complète est détaillée dans [19] et [20]. Le solveur utilise la méthode Block-Lanczos pour résoudre le problème discrétisé, ce qui conduit au calcul des vecteurs propres et fréquences propres de la structure étudiée. Les modèles sont par la suite utilisés pour effectuer une analyse de sensibilité afin d'évaluer l'identifiabilité des paramètres.

Une analyse de sensibilité globale, de type Morris [21], basée sur les modèles numériques et les modes expérimentaux a permis de déterminer les paramètres du modèle numérique identifiables. Cela met en avant les propriétés sollicitées par les différents modes de vibrations de la structure (principalement des comportements en torsion et flexion, les modes de traction-compression étant très élevés en fréquence, ils n'ont pas été mesurés). L'analyse de sensibilité permet d'obtenir une cartographie des effets de chaque paramètre sur les modes appariés, sous la forme d'une matrice de sensibilité. Dans le processus d'identification, les modes propres calculés par analyse modale sont comparés aux modes opérationnels obtenus par post-traitement des champs de déplacement par la méthode du lissage de fonction de réponse en fréquence (LSCF). L'appariage des modes est effectué avec un critère MAC (Modal Auto-Correlation, proposé par Allemang en 1982 [22]). Ce critère compare les vecteurs propres de chaque mode et permet de quantifier, dans une échelle allant de 0 à 1, la proximité spatiale des champs de déplacement expérimentaux et numériques. Pour cette étude, la valeur utilisée pour considérer l'appariage de deux modes est de 0.7 qui est une valeur à partir de laquelle la corrélation est estimée satisfaisante. Cette analyse permet aussi d'évaluer les facteurs de perte directionnels. En effet, lorsqu'un mode est sensible à un seul paramètre élastique à la fois, le facteur de perte correspondant à la direction de ce paramètre peut être calculé en doublant la valeur de l'amortissement modal du mode considéré.

2.2.4. Recalage de modèle

Les paramètres élastiques sont identifiés par la minimisation d'une fonction coût définie par la somme de la valeur absolue de l'erreur relative des fréquences propres numériques/expérimentales appariées. L'algorithme utilisé pour cela est implémenté dans MATLAB®. L'optimisation est basée sur un algorithme de convergence rapide. La résolution est de type gradient, et à chaque itération une matrice de sensibilité est calculée. La fin du processus d'optimisation est définie par un critère de convergence de la variation relative de la fonction coût (0.01). A la fin de la procédure d'optimisation, un ensemble de paramètres élastiques optimaux est obtenu.

2.3. DMA et essais quasi-statiques

Des essais de flexion trois points, dont la distance entre les appuis est de 45mm et d'analyse mécanique dynamique (Dynamical Mechanical Analysis (DMA)) ont été effectués sur une machine de traction électrodynamique BOSEelectroforce®. Les principes usuels de flexion trois points sont utilisés. Un déplacement est imposé par la traverse. La cellule de force utilisée a une capacité de 450 N. La vitesse

du déplacement lors de l'essai est de $40 \mu\text{m/s}$. Le module apparent est calculé par la méthode de la tangente au niveau des petites déformations. En DMA, une force comprise entre -0.5 et -1.5 N est appliquée sur les échantillons à une fréquence comprise entre 0.1 et 10 Hz. Le balayage en température est compris entre -40 et 130 °C. Un post-traitement des résultats de DMA est effectué en utilisant des algorithmes développés sous MATLAB®.

3. Résultats

L'application de cette méthode mixte expérimentale/numérique aux tables de violon en composite biosourcé et bois cintré a conduit à l'obtention des propriétés élastiques résumées dans le tab. 1 pour le composite biosourcé et le tab. 2 pour la table cintrée. Pour l'échantillon en composite biosourcé, l'analyse de sensibilité conduit à retenir trois paramètres élastiques pour l'identification ; (E_L , E_T et G_{LT}) et trois facteurs de perte (η_L , η_R , η_{LR}). L'échantillon en bois dans son état initial (plaque) ou cintré conduit à l'identification de cinq rigidités : E_L , E_R , G_{LR} , G_{RT} , G_{TL} , et les facteurs de perte (η_L , η_R , η_{LR}). Les paramètres considérés comme non influents seront par la suite fixés à une valeur arbitraire dans le processus de minimisation, et seront fixés à leur valeur nominale. Dans le cas du matériau composite, le module d'Young longitudinal identifié, particulièrement élevé pour ce type de matériaux a été comparé à celui obtenu grâce à des essais quasi-statiques en flexion trois points sur des échantillons prélevés dans la plaque fabriquée. Le module apparent obtenu par cette approche (40.5 GPa) est du même ordre de grandeur que celui identifié (42.5 GPa). Une analyse mécanique dynamique, avec variation de la température a également été effectuée. Cette mesure permet de mesurer directement le facteur de perte et le module de stockage du matériau. Un modèle Williams-Landell-Ferry (WLF) permet d'extrapoler les valeurs obtenues à basse température vers des fréquences plus élevées, à plusieurs centaines de hertz. Ainsi, les paramètres identifiés sont conformes à ceux obtenus par des essais plus traditionnels et destructifs.

Tab. 1. Résultats pour le composite biosourcé

	FEMU	Essais quasi-statiques	DMA (WLF à 1000 Hz)
E_L (GPa)	42.5	40.5	42
E_{Tr} (GPa)	4.2	3.8	-
G_{LT_r} (MPa)	740	-	-
η_L (%)	2	-	2
η_{Tr} (%)	2.2	-	-
η_{LR} (%)	2.4	-	-

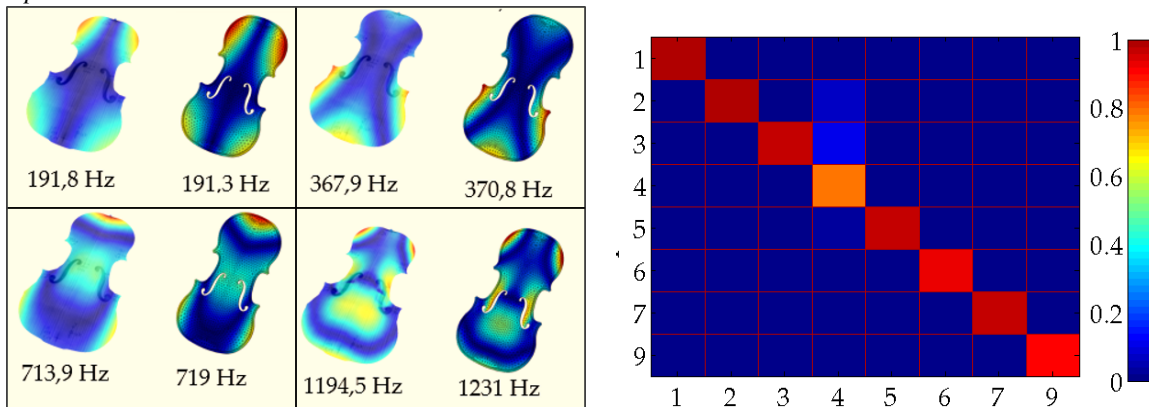
Tab. 2. Résultats pour le bois cintré

	Initial	Cintré
E_L (MPa)	14000	15600
E_R (MPa)	850	940
G_{LR} (MPa)	740	820
G_{RT} (MPa)	52	55
G_{TL} (MPa)	600	520
η_L (%)	0.62	1.1
η_R (%)	1.62	1.46
η_{LR} (%)	1.52	1.38

Dans le cas du bois cintré, les propriétés élastiques et dissipatives ont été identifiées avant et après cintrage. Celles correspondant à la plaque initiale sont conformes aux valeurs couramment obtenues pour ce type de bois (épicéa de lutherie [23]). Un exemple de déformées modales expérimentales et

numériques est donné pour le bois cintré sur la fig.5, ainsi que la matrice de MAC correspondante, comparant 8 modes de vibration. Ces résultats préliminaires montrent un effet légèrement raidissant du cintrage sur la plupart des propriétés, ce qui peut s'expliquer par une ré-organisation dans le sens longitudinal des trachéides composant ce type de résineux.

Fig. 5. Exemple de déformées modales expérimentales (gauche) et numériques (droit) après recalage et matrice MAC correspondante au bois cintré



4. Conclusions

Les résultats montrent qu'il est possible d'identifier finement et simultanément plusieurs paramètres constitutifs de façon non-destructive. De plus, cette méthode permet d'évaluer l'impact de certains processus de mise en forme. Les résultats sont validés par des essais traditionnels ou comparés à des bases de données usuelles de ces types de matériaux. Le nombre et la nature des paramètres identifiables dépendent de la géométrie de la pièce et du nombre de modes propres mesurés sur la plage de fréquence. Des développements ultérieurs pourront permettre de prendre en compte l'éventuelle dépendance spatiale et temporelle de certains des paramètres constitutifs. Toutefois, cette méthode est sensible aux incertitudes portant sur la mesure des dimensions des échantillons et l'évaluation de la densité. Ces derniers paramètres étant très influents sur le comportement vibratoire d'une structure, la propagation de leurs incertitudes conduit à une incertitude sur les paramètres mesurés. Par ailleurs, les nombreuses étapes, allant de la mesure expérimentale à la création du modèle numérique et la procédure de recalage induisent des risques d'erreurs potentiels.

Références

- [1] L. Bruno, G. Felice, L. Pagnotta, A. Poggialini, G. Stigliano «Elastic characterization of orthotropic plates of any shape via static testing», *International Journal of Solids and Structures*, vol. 45(3-4), pp. 908-920, 2008.
- [2] S. Avril, M. Bonnet, A.B. Michel, F. Hild, P. Ienny, F. Latourte, F. Pierron «Overview of Identification Methods of Mechanical Parameters Based on Full-field Measurements», *Experimental Mechanics*, vol. 43, pp. 381-402, 2008.
- [3] F. Hild, S. Roux «Digital Image Correlation : from Displacement Measurement to Identification of Elastic Properties – a Review», *Strain*, pp. 69-80, 2006.
- [4] H. Sol «Identification of anisotropic plate rigidities using free vibration data», Ph.D. thesis, University of Brussels, 1986.
- [5] M.E. McIntyre, J. Woodhouse «On measuring the elastic and damping constants of orthotropic sheet materials» *Acta Metallurgica*, vol. 36(6), pp. 1397-1416, 1988.

- [6] J.E. Mottershead, M. Link, M.I. Friswell «The sensitivity method in finite element model updating : A tutorial», *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25(7), pp. 2275–2296, 2011.
- [7] T. Lauwagie, H. Sol, G. Roebben, W. Heylen, Y. Shi, O. Van Der. Biest «Mixed numerical – experimental identification of elastic properties of orthotropic metal», *NDT & E International*, vol. 36, Issue 7, pp. 487-495, 2003.
- [8] M. Rébillat, X. , Boutillon, «Measurement of relevant elastic and damping material properties in sandwich thick plates», *Journal of Sound and Vibration*, vol. 330(25), pp. 6098–6121, 2001.
- [9] M. Schwaar, T. Gmür, J. Frieden «Modal numerical – experimental identification method for characterising the elastic and damping properties in sandwich structures with a relatively stiff core», *Composite Structures*, vol. 94, pp. 2227–2236, 2012.
- [10] M. Matter, T. Gmür, J. Cugnoni, A. Schorderet «Identification of the elastic and damping properties in sandwich structures with a low core-to-skin stiffness ratio», *Composite Structures*, vol. 93(2), pp. 331–341, 2011.
- [11] B.S. Ohlsson, M. Perstorper «Elastic wood properties from dynamic tests and computer modeling», *Journal of Structural Engineering*, vol. 118(10), pp. 2677–2690, 1993.
- [12] S. Corn, P. Ienny, J.S. Dupuy «Identification des propriétés viscoélastique d'un PMMA par analyse vibratoire : comparaison entre différentes méthodes expérimentales», *Abstract : CFM*, pp. 24–28, 2009.
- [13] J. Cunha, J. Piranda «Identification of Stiffness Properties of Composite Tubes from Dynamic Tests», *Experimental Mechanics*, vol. 40(2), pp. 211–218, 2000.
- [14] M.A. Pérez Martinez, P. Poletti, L. Gil Espert «Vibration Testing for the Evaluation of the Effects of Moisture Content on the In-Plane Elastic Constants of Wood Used in Musical Instruments», *Vibration and Structural Acoustics Analysis*, 2011.
- [15] L. Mehrez, D. Moens, D. Vandepitte «Stochastic identification of composite material properties from limited experimental databases , part I : Experimental database construction», *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 27, pp. 471–483, 2012.
- [16] L. Mehrez, A. Doostan, D.Moens, D. Vandepitte «Stochastic identification of composite material properties from limited experimental databases, Part II : Uncertainty modelling», *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 27, pp. 484–498, 2012.
- [17] J.H. Tam, Z.C. Ong, Z. Ismail, B.C. Ang, S.Y. Khoo «Identification of material properties of composite materials using non-destructive vibrational evaluation approaches : A review», *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 6494, 2016.
- [18] M. Matter, T. Gmür, J. Cugnoni, A. Schorderet «Numerical-experimental identification of the elastic and damping properties in composite plates», *Composite Structures*, vol. 90(2), pp. 180–187, 2009.
- [19] J. Cugnoni, T. Gmür «Identification par recalage modal et fréquentiel des propriétés constitutives de coques en matériaux composites», Ph.D. thesis, École polytechnique fédérale de Lausanne, 2004.
- [20] A. Moreau «Identification de propriétés viscoélastiques de matériaux polymères par mesures de champs de réponses en fréquence de structures», Ph.D. thesis, INSA de Rouen, 2007.
- [21] M.D. Morris «Factorial sampling plans for preliminary computational experiments», *Technometrics* , vol. 33, pp. 161–174, 1991.
- [22] R.J. Allemang, D.L. Brown «A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis», *Proceedings, International Modal Analysis Conference*, pp.110-116, 1982.
- [23] I. Brémaud, J. Gril, B. Thibaut «Anisotropy of wood vibrational properties : Dependence on grain angle and review of literature data», *Wood Science and Technology*, vol. 45(4), pp. 735–754, 2011.