

Matériaux composites et outils de simulation pour la compréhension de la facture instrumentale d'une guitare classique écoresponsable

Composite materials and simulation tools for understanding the instrument making of a sustainable classical guitar

Jérôme Barbaza, Guilherme Machado, Aurélien Maurel-Pantel, Christophe Vergez

Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Med, LMA, Marseille, France

e-mail : barbaza@lma.cnrs-mrs.fr et machado@lma.cnrs-mrs.fr et maurel@lma.cnrs-mrs.fr et vergez@lma.cnrs-mrs.fr

Résumé

La fabrication de guitares est traditionnellement basée sur un artisanat de qualité et des matériaux naturels rigoureusement sélectionnés. Le contexte de la pénurie de bois tropicaux ou de bois de qualité « lutherie » mène à s'intéresser à la fois aux matériaux qui constituent l'instrument mais aussi à la compréhension de l'influence des paramètres de conception sur la qualité finale de l'instrument. Pour ce faire, un procédé de fabrication de guitares éprouvettes par la technique du moulage de composite préimprégné simple et répétable est proposé. Cet outil permettra de réaliser des guitares éprouvettes en ne faisant varier qu'un paramètre pour mesurer son impact sur la sonorité. La guitare a été modélisée en CAO et modifiée pour s'adapter à la méthode de fabrication. Elle résulte de l'assemblage de 4 parties hors accastillage. Sur ces échantillons, la mesure vibro-acoustique pourra être réalisée par vibromètre laser (analyse modale) ou en chambre anéchoïque pour le champ lointain (sonorité). Une première guitare 100 % fibre de lin a été réalisée, validant ainsi la méthode de fabrication. Des premières mesures d'impact sur des tables d'harmonies non assemblées permettant de valider un modèle numérique sont présentées ici.

Mots Clés : guitare, composite, éléments finis, analyse modale, acoustique

Abstract

Guitar making is traditionally based on quality craftsmanship and rigorously selected natural materials. The shortage of tropical woods or instrument making quality woods means that we need to take an interest not only in the materials that make up the instrument, but also in understanding the influence of design parameters on the final quality of the instrument. To this end, a process for manufacturing sample guitars using the simple and repeatable prepreg composite moulding technique is proposed. This tool will make it possible to produce test guitars by varying just one parameter in order to measure its impact on the sound. The guitar has been modelled in 3D and modified to suit the manufacturing method. It results from the assembly of 4 parts, excluding the fittings. On these samples, the vibro-acoustic measurement can be carried out using a laser vibrometer (modal analysis) or in an anechoic chamber for the far field (sonority). A first 100% flax fibre guitar has been produced, validating the manufacturing method. Initial impact measurements on unassembled soundboards are presented here, enabling a numerical model to be validated.

Keywords : guitar, composite, finite elements, modal analysis, acoustique

1. Introduction

Le projet propose de réaliser des guitares en matériau composite en tant qu'échantillon de mesure et d'analyse de la facture instrumentale. Ce choix d'utiliser le matériau composite répond à deux critères : premièrement une meilleure maîtrise de la répétabilité du matériau obtenu en comparaison du bois et une très bonne maîtrise de la répétabilité de la technique de fabrication. Dans la plupart des études sur l'instrument, les guitares testées en bois intègrent systématiquement une variabilité due au bois utilisé. Ce matériau naturel est à chaque création de guitare unique. Le composite préimprégné comporte des caractéristiques moins variables. Cette variabilité étant toutefois non nulle, elle sera quantifiée comme préalable au début de l'étude.

La première étape de ce projet a consisté à modéliser une guitare classique en 3D. Les guitares classiques comportent peu de variations géométriques contrairement à leurs sœurs à cordes métal. Ainsi le choix s'est porté sur les plans de la guitare de Daniel Friederich, luthier français de renommée internationale et décédé en 2020[1]. L'utilisation du logiciel 3Dexperience de Dassault System a permis de concevoir un assemblage de pièces à l'image de la guitare en bois. Ce point de départ constitue l'origine de la chaîne numérique et permettra de conserver la géométrie tout au long des étapes du projet. La méthode employée pour la fabrication découle du matériau utilisé. Ici, peu de découpe et d'ajustage, qui font le métier de l'artisan luthier mais du moulage sous vide et du détourage par commande numérique qui permettent une reproductibilité géométrique accrue. La réalisation du moule fige la géométrie externe de la guitare ne permettant pas, dans un premier temps et à moindre coût, de tester des configurations géométriques diverses. Mais l'outillage permet de jouer aisément sur la conception de la table harmonie de la guitare, pièce centrale responsable en grande partie de la sonorité de l'instrument[2].

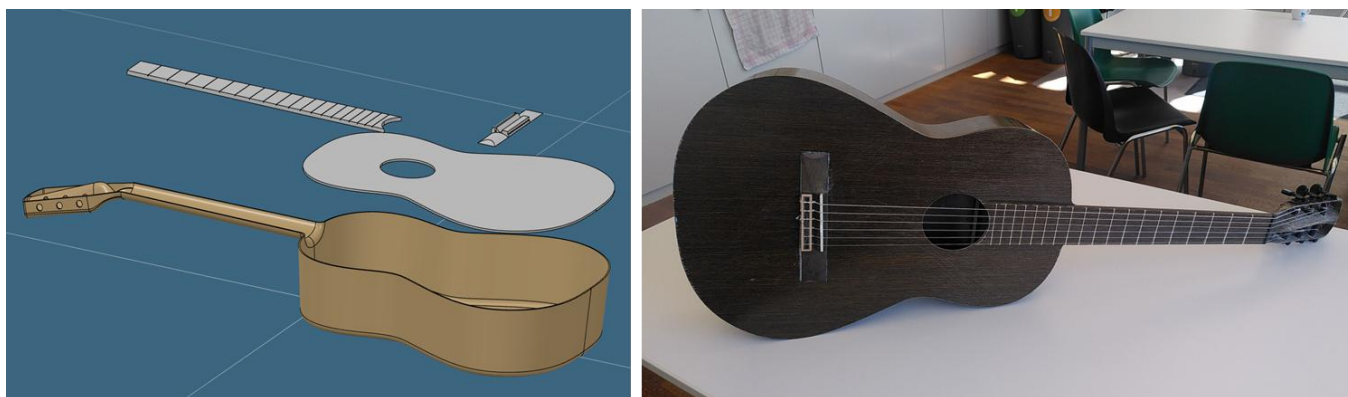


Fig. 1. La guitare en composite à fibre de lin.

2. Fabrication guitare composite

La méthode de fabrication impose son lot de contraintes qui nécessitent de faire évoluer la géométrie initiale. Cependant, les fonctions de la pièce doivent être conservées et non altérées. Afin d'éviter de fastidieuses étapes d'ajustage et de collage, il a été décidé de réaliser complètement l'arrière de l'instrument en une seule partie. Une seule pièce moulée qui permettra de recevoir les autres éléments par collage. Cette décision est confortée par la littérature où la majorité des études affirment le caractère prépondérant de l'influence de la table d'harmonie et du barrage sur la sonorité de l'instrument[3].

Il est ainsi nécessaire de définir, dans notre procédé de moulage en autoclave, un plan de joint et une direction de démoulage. Ceci permettra d'ajouter de la dépouille et d'éviter les contre-dépouilles. Les éclisses ont donc été inclinées de quelques degrés et un congé est réalisé au fond de la guitare. La liaison caisse-manche originellement renforcée par le talon a été simplifiée. La tête qui habituellement possède une épaisseur relativement importante a été modifiée pour correspondre à une forme de pièce dite « fine ». La solution utilisée est fortement inspirée de la guitare du fabricant Black Bird[4]. Pour la mise en œuvre des collages des autres parties cette pièce arrière a été épaissie en périphérie de manière à obtenir une zone de collage de 5 mm environ correspondant à ce qui se fait sur une guitare en bois.

Il est important de noter que bien que cette pièce arrière soit unifiée, il est toujours possible de lui donner des caractéristiques différenciées d'une zone à une autre en faisant varier le nombre de pli, l'orientation ou même la nature des fibres utilisées. Par exemple, si cela est nécessaire, il sera possible de renforcer le manche afin de lui donner une plus grande rigidité en flexion par l'ajout de pli supplémentaire. La touche et la table sont aussi réalisées en fibre de lin, leur nature plane nous permet de les mouler plus simplement. Le barrage est réalisé aussi dans une plaque de composite à fibres de lin. Chaque élément est détourné en usinage à commande numérique.

Le moule a été réalisé en aluminium sur le centre d’usinage de la Plateforme Composite Marseille et les opérations d’assemblage ont été réalisées par collage comme illustré sur la Fig. 2. La colle utilisée est une colle bi-composant Loctite UK 1351 B25 à base de polyuréthane.

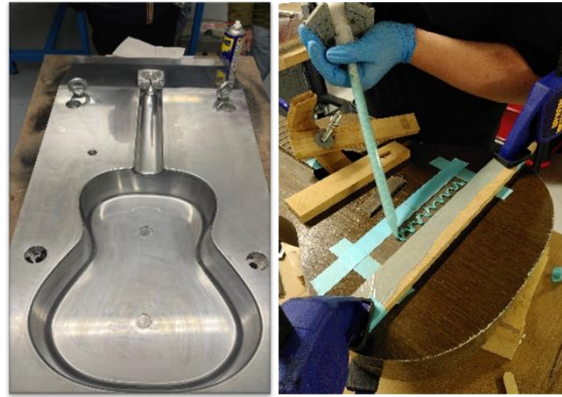


Fig. 2. Outillage et assemblage pour réaliser la guitare en composite à fibre de lin.

3. Caractérisation du composite à fibre de lin

Le matériau choisi pour la réalisation de la guitare est le FlaxPregT-UD de la société EcoTechnilin. C’est un préimprégné composé de fibre de lin et de résine époxy. Des plaques ont été réalisées dans un autoclave Daxen pour une cuisson de 2h à 120°C sous 5 bars. Avec ces conditions, un taux de fibre de 57% est obtenu et le pli unidirectionnel à une épaisseur de 0.138 mm. Trois différents empilements sont réalisés un [0]8S, un [90]8S, et un [0,90]8S. Une campagne expérimentale a été menée pour caractériser les propriétés mécaniques du matériau composite à fibre de lin. La forme de l’éprouvette a été choisie avec un grand rayon de courbure afin de limiter la concentration de contrainte et permettre la rupture au centre de l’éprouvette.

Les éprouvettes sont usinées par CNC, à 0°, 90°, et +/-45°. Les essais de traction sont réalisés avec un dispositif de vidéo extensométrie sur une machine Shimadzu. On choisit un cycle charge /décharge pour chaque éprouvette et une vitesse de déplacement de 4 mm.min⁻¹. Les résultats obtenus après traitement des données des essais sont reportés en Table 1.

Modules d’Young			Coefficient de Poisson			Modules de cisaillement		
E1	E2	E3	v12	v13	v23	G12	G13	G23
38	4,16	4,16	0.6	0.3	0.3	1.8	1.8	1.3
GPa	GPa	GPa	SU	SU	SU	GPa	GPa	GPa

Tab. 1. Caractéristiques mécaniques du Eco-technilin flaxPregT-UD.

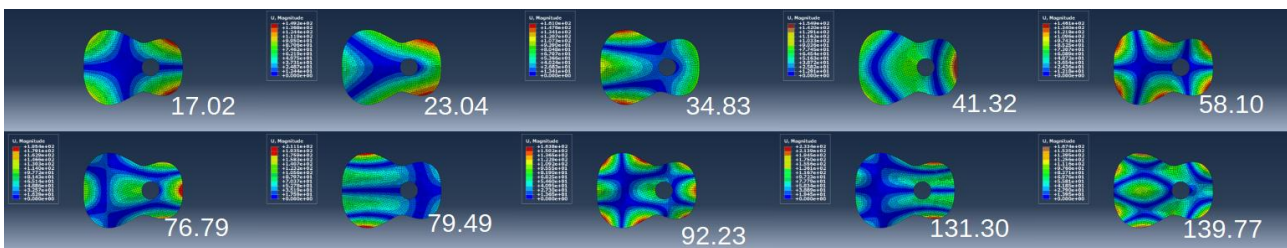


Figure 3 : Modélisation éléments finis des fréquences propres de la table d’harmonie non barrée

4. Modélisation numérique de la table d’harmonie

La modélisation numérique doit permettre à terme de réaliser une copie modale d’une guitare de référence et d’en analyser les variations dues à d’autres paramètres. Pour cela le modèle de guitare complet comprenant la structure composite, l’air de la cavité et les cordes tendues doit être mis au point et servir d’outil de dimensionnement. La construction d’un tel modèle passe par des étapes préalables et des validations intermédiaires. Ainsi, dans un travail

préliminaire, la table seule et la table avec barrage ont été simulées sur le logiciel Abaqus. L'analyse fréquentielle permet d'obtenir les dix premiers modes propres (Fig.3). Le modèle géométrique est issu du modèle numérique initial. Une modélisation coque avec un maillage de type quad est utilisé. Après une étude de convergence, une taille de maille de 8 mm a été choisie. Le matériau, décrit dans la section précédente, est défini ainsi que l'orientation de l'UD dans chaque zone. Les conditions aux limites correspondent aux conditions de mesure : bord libre et un appui en haut de la rosace. Les résultats sont reportés en Table 2 et Table 3. Comme attendu les fréquences propres augmentent avec la rigidification de la structure du barrage, certains modes sont aussi avantagés par rapport à d'autres.

Mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fréquence (hz)	17,0	23,0	34,8	41,3	58,1	76,8	79,5	92,2	131,3	139,8

Tab. 2. Fréquences propres de la table d'harmonie seule

Mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fréquence (hz)	25,5	43,5	57,3	95,5	97,4	120,1	135,2	166,9	177,6	207,4

Tab. 3. Fréquences propres de la table d'harmonie barrée



Figure 4 : Mesure acoustique des fréquences propres de la table d'harmonie non barrée. A gauche : mailloche d'impact à tête de liège et microphone en champ proche. A droite : module de la transformée de Fourier de la pression rayonnée enregistrée par le micro.

5. Validation expérimentale

Afin de valider cette première approche numérique, il est nécessaire de confronter ces résultats à des valeurs expérimentales. Pour cela la méthode de l'analyse de la réponse en pression à travers le calcul de sa transformée de Fourier est utilisée. L'impulsion est réalisée manuellement à l'aide d'une mailloche, la mesure est réalisée successivement 5 fois par un micro en champ proche. Cette technique simpliste est décrite dans le document de G. Nicoletti pour l'APLG[5] sa répétabilité est estimée par l'auteur en se basant sur de multiples essais. Il en résulte une très bonne répétabilité pour l'analyse des fréquences des pics. Le micro utilisé est un micro à condensateur à petite membrane RODE M5, la mailloche possède un embout en liège. Le logiciel REW est utilisé pour l'acquisition et le traitement. La table d'harmonie est suspendue par la rosace. La configuration est présentée sur la Fig.4. Les résultats expérimentaux qui paraissent proches sont difficiles à interpréter en l'état. Contrairement à l'analyse par EF, la mesure en champ proche de la réponse en pression ne permet pas de déterminer les modes en présence. Les mesures de fréquences à l'impact au point du chevalet sont reportées en Table 4. En prenant l'exemple du premier mode prépondérant de la mesure évalué à 35,1 Hz, il pourrait être rapproché du mode 34,8 Hz calculé, le plus proche. Mais si l'erreur du modèle était plus importante, cela pourrait en être tout autre. L'estimation de l'erreur est donc incertaine, ces premiers travaux préparent et motivent notre analyse vibro-acoustique plus fine à l'aide d'un vibromètre laser au laboratoire.

Modes mesurés (Hz)	23,3	35,1	47,1	81,9	143	152
--------------------	------	------	------	------	-----	-----

Tab. 4. Fréquences mesurées par l'impact au point du chevalet sur la table d'harmonie non barrée

Pour mieux identifier les modes en présence, il est nécessaire de considérer le point d'impact. L'impact va en effet imposer un déplacement non nul au point d'impact et n'excitera que les modes répondant à ce critère. Autrement dit, les modes possédant un nœud au point d'impact ne seront pas excités. Par analogie, et en modifiant le point d'impact, il est possible d'identifier avec une grande probabilité les modes en présence et ainsi estimer l'erreur du modèle numérique. La Fig.5 présente les points d'impact définis, ces derniers sont choisis pour exciter différents modes.

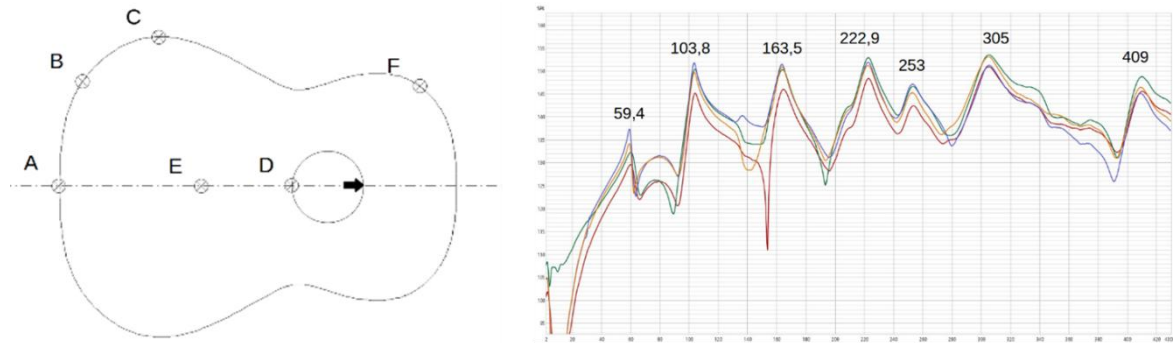


Figure 5 : A gauche les différents points d'impact choisis sur la table non barrée et à droite les transformées de Fourier de 5 différentes impulsions au même point pour évaluer la répétabilité de mesure

La Table 5 présente les résultats obtenus pour les différents points d'impact comparés aux modes obtenus par simulation éléments finis. En gris les modes qui ne sont pas excités par le point d'impact choisi. Les fréquences mesurées correspondent assez bien avec les prévisions du modèle. Toutefois quelques incertitudes persistent. Le premier mode est complètement absent des mesures. Il est possible de remettre en cause le matériel audio utilisé dont la plage d'utilisation se trouve au-delà de 17 Hz. L'absence du mode à 76,8 Hz en réponse à l'impact aux points D et E est notable, elle est à opposer à la présence non attendue du mode à 79,5 Hz. Ces 2 modes étant très proches, il est possible que des phénomènes de couplage soient en jeu et masquent l'un ou l'autre mode. Il en est de même pour les modes à 131,3 Hz et à 139,8 Hz. L'erreur relative est estimée par le rapport $\Delta f_i / f_i$ qui présente une valeur moyenne de 5% sur les dix premiers modes.

Abaqus	Impact au pt A	Impact au pt B	Impact au pt C	Impact au pt D	Impact chevalet E	Impact au pt F
17,0						
23,0	26		26,3			26,1
34,8	35,1		36,1	35,1	35,1	37,8
41,3	46,9	46,9	47	46,7	47,1	47,2
58,1	61,2	61,5				61,7
76,8	70					73
79,5	82,5	81,9	82	81,9	81,9	83,7
92,2	93,2	93,5		93,8		96,2
131,3		120,5	129			135
139,8	146	145,6	143		143	147

Tab. 5. Fréquences mesurées aux différents points d'impact comparées aux modes calculés par la simulation éléments finis pour la table d'harmonie non barrée.

La modélisation de la table barrée rajoute quelques éléments d'incertitude : la position et la géométrie des barrages ainsi que le collage. La même démarche expérimentale est réalisée, les premiers résultats peuvent d'ores et déjà être exploités. L'impact est cette fois réalisé à la position du chevalet. L'identification est réalisée en tenant compte des modes excités. La Fig.5 montre une série de mesure d'impact mettant en exergue la répétabilité des mesures des fréquences pics. La Table 6 présente la comparaison entre les valeurs expérimentales et numériques. Cette identification apparaît cohérente. L'erreur relative est du même ordre de grandeur que dans le cas de la table sans barrage.

Modes calculés	25,5	43,5	57,3	95,5	97,4	120,1	135,2	166,9	177,6	207,4
Modes mesurés (Hz)			59.4	103.8				163.5		

Tab. 6. Fréquences mesurées par l'impact au point du chevalet pour la table d'harmonie barrée.

6. Conclusion

Ces premiers essais préliminaires montrent que le modèle numérique, comme discuté dans la bibliographie[6], peut s'avérer suffisamment performant pour l'étude vibro-acoustique de notre guitare composite à fibre de lin. De nombreux travaux ont déjà étudié la dynamique des tables d'harmonie [7] [8] [9][10]. Pour le futur, il sera nécessaire d'aller plus loin et de compléter le modèle éléments finis en prenant en compte l'ensemble des éléments constituant la guitare. Ce modèle constituera un outil de dimensionnement central dans l'étude qui permettra de concevoir et dimensionner les prochaines guitares, nombre de pli, orientation, barrage architecturé en visant une copie modale idéale. Concernant la mesure, il est nécessaire d'aller plus loin en utilisant d'autres moyens de mesure comme le vibromètre laser qui permet une meilleure identification des modes, et des algorithmes de décompositions modales plus adaptés comme l'algorithme ESPRIT [11] ou encore MUSIC [12]. Par la suite, ce modèle pourra permettre de mettre au point une technique de fabrication orientée composite en évitant les nombreux collages du barrage sur la table d'harmonie et éviter le Flax-Wood non optimal.

Références

- [1] S. Stenzel, « A few words in memory of Daniel Friederich », juill. 2023.
- [2] N. Abaeian, « Finite element design and manufacturing of a nylon-string guitar soundboard from sandwich-structured composites ».
- [3] D. Friederich, « Les tables des guitares classiques », *Société Française d'Acoustique*, 1998.
- [4] G. Gardiner, Bio-prepreg guitar: The look, feel, acoustic quality of wood. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.compositesworld.com/articles/bi-prepreg-guitar-the-look-feel-and-acoustic-quality-of-wood->
- [5] de G. Nicoletti, « Mesurer la réponse en fréquence de la guitare acoustique ».
- [6] M. J. Elejabarrieta, A. Ezcurra, et C. Santamar, « Vibrational behaviour of the guitar soundboard analysed by the Finite Element Method », vol. 87, 2001.
- [7] T. Ono, « Frequency responses of wood for musical instruments in relation to the vibrational properties. », *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, *J Acoust Soc Jpn E*, vol. 17, n° 4, p. 183- 193, 1996, doi: 10.1250/ast.17.183.
- [8] A. Brauchler, P. Ziegler, et P. Eberhard, « Numerical Models for Classical Guitars with Updated Parameters from Experimental Data », p. 7 pages, 2020, doi: 10.48465/FA.2020.0072.
- [9] R. Viala, « Towards a model-based decision support tool for stringed musical instrument making ».
- [10] Giro, Y., Le Carrou, J. L., Vincenti, A., Dartois, S., Viala, R., & Navarret, B. (2023). Predicting the effects of bracing pattern modifications on acoustic guitar soundboards. In *Forum Acusticum* (pp. 3419-3422).
- [11] R. Roy, A. Paulraj, et T. Kailath, « Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques - ESPRIT ».
- [12] A. Yasir, « Une comparaison des méthodes d'estimation de fréquence FFT, MUSIC et ESPRIT | Cartes RAY ». Consulté le: 22 novembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.raymaps.com/index.php/a-comparison-of-fft-music-and-esprit-methods-of-frequency-estimation/>