

Conserver l'instrument de musique en état de jeu : contraintes d'origine et origines des contraintes mécaniques au sein de l'instrument de musique à cordes

Victor Almanza, Doctorant, CY Cergy Paris Université (victor.almanza@univ-fcomte.fr).

Stéphane Vaiedelich, Responsable du laboratoire de recherche et de restauration du Musée de la musique à Paris, ECR, Musée de la Musique – Centre de Recherche sur la Conservation (CRC), Muséum national d'histoire naturelle, CNRS, ministère de la Culture (svaiedelich@cite-musique.fr).

Vincent Placet, Ingénieur de recherche - UBFC, Département de Mécanique Appliquée – Institut FEMTO-ST, UMR CNRS 6174, Université de Bourgogne Franche-Comté (vincent.placet@univ-fcomte.fr).

Scott Cogan, Chargé de recherche - CNRS, Département de Mécanique Appliquée – Institut FEMTO-ST, UMR CNRS 6174, Université de Bourgogne Franche-Comté (scott.cogan@univ-fcomte.fr).

Emmanuel Foltête, Professeur des universités - ENSMM, Département de Mécanique Appliquée – Institut FEMTO-ST, UMR CNRS 6174, Université de Bourgogne Franche-Comté (emmanuel.foltete@femto-st.fr).

Stéphane Serfaty Professeur des universités - Laboratoire Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Énergie (SATIE), CNRS UMR 8029, CY Cergy Paris Université (stephane.serfaty@cyu.fr).

Sandie Le Conte, Responsable du laboratoire - Ingénieur de recherche - Département des Restaurateurs, Laboratoire de recherche, Institut National du Patrimoine (sandie.leconte@inp.fr).

Résumé. Quel est l'état mécanique d'un objet conservé dans les collections patrimoniales ? Cet état mécanique est-il compatible avec la valeur d'usage que les musées d'instruments de musique ont pour mission de conserver ? Afin de garantir des modalités déontologiques de conservation des instruments de musique à cordes, une plateforme numérique d'aide à la décision du maintien en état de jeu pour les instruments à cordes est en cours de conception. Prenant en compte l'état matériel de la structure et les différents efforts qui s'appliquent sur

l'instrument de musique, l'approche mécanique développée, qui exploite les outils les plus récents de cette discipline, permet d'évaluer les paramètres qui influencent le plus le comportement dynamique de l'instrument, et avec quel niveau de méconnaissance des paramètres d'entrée le pronostic de remise en état de jeu demeure valable. Les modèles mécaniques présentés apportent des réponses quantifiées en termes de risque d'endommagement de l'œuvre maintenue en état de jeu et mettent en évidence que les états de contrainte induits par les gestes de fabrication initiaux doivent être pris en compte et peuvent conditionner la potentialité musicale des instruments.

Mots-clés. Instrument de musique en bois et à cordes, patrimoine culturel, table d'harmonie, contraintes d'origine, techniques de barrage, simulation numérique, comportement vibratoire.

Introduction

L'existence de collections d'instruments de musique, reconnues au niveau national et international, incite à penser que l'instrument de musique peut être considéré comme un objet à caractère patrimonial au même titre que l'ensemble des objets composant les collections muséales. Objet d'art et d'usage, profondément inscrit dans l'histoire de toutes les cultures et de toutes les époques, les fonctions musicales qu'il recèle font cependant de lui un objet singulier. Il résulte de nombreux choix de fabrication, comme le matériau. Comme le souligne le père Mersenne dès 1637 dans son *Traité de l'harmonie universelle*, il faut « pour faire une bonne flûte choisir un bois qui saura ravir l'oreille et séduire l'œil ». Cependant la dimension mécanique prédomine dès lors qu'il s'agit d'un instrument à cordes – qu'elles soient frappées, pincées, frottées. Cette importance dérive des fortes contraintes mécaniques et des phénomènes vibratoires induits par la tension des cordes nécessaire à son utilisation musicale.

À la fin du siècle dernier, sous l'impulsion d'une génération de pionniers, penseurs du jeu de l'instrument de musique dans le cadre muséal, le Comité International des Musées et Collections d'Instruments de Musique (CIMCIM), sous l'égide de l'ICOM, a édité des textes qui constituent le socle des politiques de jeu des instruments de musique des collections publiques sur le plan international. Si ces textes font encore référence, de nouveaux éléments viennent aujourd'hui enrichir cette problématique et ouvrent de nouvelles pistes. D'une part, les connaissances récentes en psychoperception, en science des matériaux et en organologie viennent questionner les dogmes initiaux qui définissaient l'identité de l'instrument de musique historique lui-même, et montrent combien ces références doivent être relativisées¹. D'autre part, l'intégration, depuis un peu plus de dix ans, de la mécanique et du calcul de

structure au sein de la recherche en conservation-restauration des instruments maintenus en état de jeu² offre de nouvelles perspectives méthodologiques et pratiques d'intervention³.

S'il semble a priori préjudiciable de mettre sous tension un instrument de musique à cordes, la question mérite d'être approfondie. On ne peut raisonnablement y répondre sans concevoir ni réaliser une analyse fine des principes de conception de l'instrument lui-même. Nombre d'entre eux échappent à l'examen visuel – au « constat d'état » au sens traditionnel du terme – et n'apparaissent qu'à la suite d'une analyse scientifique soignée mettant largement à contribution les sciences physiques.

Conserver temporairement ou à long terme l'instrument à cordes en état de jeu induit de facto une importante contrainte mécanique par la présence de cordes fortement tendues. La question de l'opportunité ou non du maintien en état de jeu est donc légitime. Aujourd'hui la réponse est donnée au cas par cas. En l'absence d'outil d'analyse de la structure, elle s'appuie principalement sur le savoir-faire des facteurs/restaurateurs. Par manque de connaissance, la quasi-totalité des instruments sont conservés hors tension. Cependant, rien ne permet d'affirmer que l'absence de cette tension, sur des objets originellement conçus pour y résister, ne les met pas dans un état de déséquilibre mécanique susceptible de les endommager.

C'est dans ce contexte qu'un projet de Plateforme d'aide à la décision du maintien en état de jeu (PadJeu) a été mis en place⁴. Il développe une approche mécanique par modèle physique, paramétrable et adaptée à chaque objet. Interrogeant l'état matériel et structurel de l'instrument de musique, cette approche questionne la possibilité objective de son maintien en état de jeu. L'objectif est de proposer aux responsables de collections d'instruments de musique, mais pas seulement, un outil de pronostic s'appuyant sur des modèles numériques de comportement mécanique statique et dynamique. Utilisé comme outil d'aide à la décision, il doit permettre d'offrir des résultats quantitatifs fiables sur l'état de l'instrument et faciliter toute prise de décision sur son mode de conservation et de restauration.

Cet article présente dans un premier temps la structure mécanique complexe que représentent les instruments de musique à cordes. Il expose ensuite la démarche sur laquelle repose l'outil de pronostic. Puis, afin d'illustrer cette méthodologie, deux exemples applicatifs sont proposés. L'un explore le comportement statique d'un instrument mis sous tension. L'autre porte sur l'impact des états de contrainte induits par les gestes de fabrication initiaux des instruments sur leur comportement dynamique.

L'instrument de musique à cordes, une structure mécanique complexe

Pour que le son d'un instrument à cordes soit perceptible, la vibration des cordes est généralement couplée à une structure ou table d'harmonie dont les vibrations sont transmises à l'air en contact avec l'instrument. Les matériaux choisis pour réaliser les tables d'harmonie sont extrêmement variés : peaux, bois, métaux, verre sont par exemple fréquents. L'art de la facture instrumentale consiste à concevoir et à réaliser une structure mécanique qui réponde à des critères subtils de perception sonore propres à chaque instrument et à chaque culture en exploitant au mieux les propriétés mécaniques des matériaux mis en œuvre. Au regard de la faible énergie que peut apporter le musicien en pinçant, frappant ou frottant les cordes, cette structure doit être fine et légère. Elle doit pourtant résister aux efforts statiques importants induits par la tension des cordes, qui représente fréquemment plusieurs centaines de newtons. Du fait des utilisations très variées de l'instrument, elle doit également rester stable dans le temps face aux variations environnementales d'exposition de l'instrument, comme les variations hygroscopiques.

Pour répondre à ce cahier des charges drastique, les facteurs, quelles que soient l'époque et la culture, ont élaboré deux stratégies complémentaires : (i) une sélection soignée des matériaux de construction des instruments, comme en témoigne par exemple la relation épistolaire entretenue par le facteur Lorenzo da Pavia avec sa cliente la princesse Isabelle d'Este ; (ii) l'optimisation du design exploitant finement les propriétés mécaniques des matériaux afin de réduire la masse de l'instrument tout en augmentant sa résistance. Pour les facteurs, obtenir un timbre particulier de l'instrument suppose de bien connaître les propriétés physiques de la table d'harmonie sur toute sa surface et de positionner soigneusement des renforts dans un double objectif : rendre l'instrument plus stable et résistant (contrainte statique) et façonner la réponse acoustique du système résonnant (réponse dynamique). Suivant les familles instrumentales, les systèmes peuvent fortement varier (fig. 1).

PadJeu et la méthode de vérification et de validation (V&V)

Partant du postulat que l'objet conservé est mal connu, tant du point de vue de ses matériaux constitutifs (identification des essences de bois, modification de leurs propriétés avec le temps) que de son état structurel, la méthodologie mise en place dans le cadre du projet PadJeu tend à quantifier l'influence de ces méconnaissances sur la prédiction de son comportement statique et dynamique.

C'est pourquoi cette dernière s'appuie sur l'approche dite de « vérification et validation » (V&V), qui se développe depuis une vingtaine d'années dans le milieu industriel. Elle consiste à développer des méthodologies et des outils d'aide à la décision à partir de simulations numériques, tout en cherchant à estimer la confiance que l'on peut accorder à une simulation numérique compte tenu de la présence d'incertitudes, de méconnaissances et d'erreurs de modélisation. Dans un premier temps, le processus de vérification évalue la fidélité du modèle de calcul par rapport au modèle mathématique. Ce processus de vérification prend en compte les problèmes liés à l'analyse numérique, aux erreurs de programmation dans le code de calcul et à l'estimation de l'erreur numérique. Puis, le processus de validation vise à déterminer la capacité prédictive d'un modèle numérique pour son utilisation prévue. Ceci est accompli en comparant les prévisions numériques (résultats de la simulation) avec les observations (résultats expérimentaux)⁵.

En prenant l'objet tel qu'il est aujourd'hui, notre méthodologie s'attache à le comparer à un objet théorique, tel qu'il serait s'il était dans un « état parfait » de conservation. Cette approche permet d'évaluer les risques encourus lors de l'application de contraintes inadaptées en fonction de la structure, de défauts mal connus tels qu'un assemblage défectueux, une perte de matière ou une fracture restaurée à de multiples reprises. PadJeu vise à identifier par le calcul les seuils d'incertitude en deçà desquels le comportement de la structure reste sous contrôle. Cette stratégie scientifique innovante construit une réponse quantifiée reliant l'état de conservation réellement connu de l'objet à l'ensemble des incertitudes et des lacunes propres à la connaissance de l'objet patrimonial. Elle peut se résumer à l'aide du diagramme suivant (fig. 2).

Les analyses de sensibilité et de robustesse vont s'appuyer sur deux critères d'intérêt. Le premier critère porte sur le comportement statique de l'objet, à savoir un critère d'endommagement⁶ basé sur la formulation du critère quadratique de Hill⁷. Le second est un critère dynamique : il s'agit du comportement vibratoire de la table d'harmonie, en particulier ses fréquences propres.

Modèle numérique

Basée sur la conception de modèles mécaniques, la méthodologie proposée dans le cadre de PadJeu nécessite l'acquisition des données géométriques 3D de l'instrument étudié, l'identification des propriétés mécaniques des matériaux constitutifs et de leur loi de comportement ainsi que la prise en compte des déformations induites par les contraintes

initiées par les facteurs eux-mêmes lors de la conception de l'instrument ou apparues suite à des variations d'hygrométrie.

Géométrie

De nombreuses approches existent pour l'acquisition de données géométriques 3D. Elle peut se faire par des moyens automatisés tels que la photogrammétrie ou le scan 3D. Cependant, dans le cadre de la méthodologie mise en place, pour faciliter la réalisation du modèle par éléments finis (attribution des propriétés matériaux, chargements, etc.), l'acquisition des données géométriques repose sur des données telles que des plans ou photos. À partir de ces données, un modèle 3D est réalisé à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur, avant d'être exporté dans un logiciel de calcul par éléments finis.

Propriétés des matériaux

Pour identifier les propriétés des matériaux constitutifs, on distingue deux types de méthodes : les méthodes directes et indirectes. Les méthodes directes sont destructives ou avec contact, ce qui les rend inenvisageables dans un contexte muséal. Les méthodes indirectes sont davantage adaptées. Elles sont basées sur la comparaison de simulations numériques avec des données expérimentales et utilisent des modèles de minimisation⁸ pour déterminer les propriétés matériaux. Cependant, ces modèles sont souvent d'autant plus complexes et peu précis que les paramètres d'influence sont nombreux et mal connus. Dans notre démarche, l'idée est justement de quantifier la fiabilité du modèle avec le minimum d'a priori sur les paramètres. Les propriétés des matériaux et leur comportement dynamique dans l'espace sont donc autant de sources d'incertitude que l'étude de sensibilité vise à estimer. Pour minimiser le nombre d'inconnues, les constantes élastiques ainsi que les coefficients utilisés dans le modèle sont estimés à partir des études de la littérature⁹. En outre, un a priori sur les comportements est pris en compte dans les calculs d'estimation en considérant les matériaux comme linéairement élastiques, voire pour certains ayant un comportement d'hygroexpansion.

Contraintes mécaniques liées aux cordes

Dès lors qu'il est pourvu de cordes et que celles-ci sont mises sous tension, l'instrument de musique est soumis à des contraintes mécaniques importantes au regard de la quantité de matière mise en œuvre pour le réaliser. Ainsi, sur les quelques centaines de grammes que pèse un violon, une guitare ou un luth, il est classique de relever des forces statiques appliquées de

l'ordre de 300 à 600 newtons. Ces efforts peuvent atteindre plusieurs milliers ou dizaines de milliers de newtons dans le cas des instruments à clavier, comme le clavecin ou le piano¹⁰.

À titre d'exemple, appliquée sur le modèle du luth emblématique réalisé par Laux Maler vers le milieu du XVI^e siècle et conservé dans les collections du musée de la Musique (inventaire N° E.2005.3.1.), notre méthodologie permet de décrire soigneusement les contraintes qui seraient générées dans l'instrument en cas de mise sous tension (fig. 3). La modélisation réalisée permet une cartographie des zones sièges des contraintes. Elle identifie clairement celles qui présentent un risque d'endommagement plus important. On observe aux extrémités du barrage, sur les bords de la table, autour du chevalet, surtout lorsque chevalet et barrage se superposent, des zones de sur-contrainte fragilisant dangereusement l'instrument en cas de mise en état de jeu.

Étude de sensibilité

Outre l'intuition et l'expérience, l'un des moyens d'identifier les paramètres les plus influents sur les critères d'intérêts consiste à effectuer une analyse de sensibilité à l'aide du modèle numérique. L'analyse de sensibilité est le processus général permettant de quantifier les effets des paramètres d'entrée du modèle sur les réponses d'intérêt. Appliquée sur le modèle du luth Laux Maler (inventaire N° E.2005.3.1.), une analyse de sensibilité a été effectuée afin d'étudier les paramètres d'entrée du modèle numérique (géométrie, propriétés matériaux) les plus influents sur les deux réponses d'intérêt, à savoir la valeur maximale du critère d'endommagement et les cinq premières fréquences propres de la table d'harmonie du luth.

La figure 4 montre à gauche les variations de la valeur maximale du critère de Hill en fonction des différents paramètres d'entrée. La position du chevalet, l'épaisseur de la table d'harmonie et celle des côtes (lattes de l'instrument constituant le fond de la caisse) sont les paramètres les plus influents sur le comportement statique de la table d'harmonie. On observe que la variation maximale est de l'ordre de 10%. Ainsi on montre qu'une faible variation de l'un des paramètres (0,1%) peut avoir une forte influence sur le comportement mécanique de la table. Le corollaire est que, pour maximiser la fiabilité de notre modèle, il faut connaître avec une grande précision ces trois paramètres. Concernant les fréquences propres, les trois paramètres critiques sont l'épaisseur de la table d'harmonie, celle des côtes et celle des barrages. Cependant, dans ce cas, la variation maximale est moins importante que précédemment, à savoir 0,1%, ce qui équivaut à la variation des paramètres. On remarque, dans les deux cas, que les paramètres les plus influents sont d'origine géométrique, en particulier l'épaisseur de

la table d'harmonie et celle des barrages. Il faudra donc identifier finement ces paramètres afin de minimiser leur influence sur la fiabilité du modèle.

Contraintes mécaniques structurelles, gestes de facture et valeurs patrimoniales

Un rapide regard sur l'évolution chronologique de la guitare montre que les gestes de facture, notamment concernant les systèmes de renfort, le plus souvent nommés « barrages », se sont complexifiés et sont devenus de plus en plus sophistiqués (fig. 5). Sur une période de quatre cents ans, le système structurel de la guitare a été profondément modifié, s'adaptant aux pratiques musicales et culturelles dès lors qu'il conserve une valeur d'usage au sein de la société. Ces transformations s'accompagnent d'ailleurs d'une évolution profonde du répertoire de l'instrument. Les gestes initiés par les facteurs lors de la conception de ces structures et les méthodes d'assemblage pratiquées participent pleinement à l'inspiration artistique tant les modifications du comportement mécanique influencent leurs valeurs immatérielles, c'est-à-dire les qualités acoustiques intrinsèquement présentes au sein de ces œuvres. Malheureusement, l'état initial de ces contraintes ajoutées volontairement ne peut qu'évoluer au cours du temps compte tenu du comportement viscoélastique du bois.

Les types de barrage et leurs méthodes d'assemblage diffèrent suivant les familles d'instruments, les périodes historiques, les écoles et les styles de facture. Bien que très variées dans le détail de leur mise en œuvre, les techniques de barrage peuvent être regroupées en deux catégories, suivant des critères mécaniques communs : les techniques utilisant des efforts extérieurs et celles utilisant le comportement mécanosorptif du bois. Quatre méthodes d'assemblage table-barre (fig. 6) sont possibles¹¹.

Impact des barrages dans le comportement vibratoire d'un instrument à cordes

Le comportement vibratoire de structures présentant un état initial de déformations et de contraintes non nulles a été largement étudié. L'interprétation des observations dépend fortement de la structure, mais également de la manière dont l'état initial a été introduit. Ainsi, malgré la richesse de la littérature, le transfert immédiat de ces observations aux tables d'harmonie en bois n'est pas envisageable¹². À l'inverse, très peu d'études existent quant à l'impact de l'état mécanique initial d'un instrument de musique sur son comportement vibratoire. Dans son travail de doctorat¹³, Adrien Mamou-Mani est probablement le premier à avoir étudié la question en identifiant les effets de non-linéarités dues à la charge statique des cordes de piano. Plus récemment, Julien Colmars, au sein du laboratoire du Musée de la

Musique, a mis en évidence la présence de précontraintes de fabrication dans les tables d'harmonie en bois¹⁴.

Malgré ces travaux, nombres d'inconnues subsistent. Le caractère unique de chaque instrument ne doit pas être sous-estimé. Outre les incertitudes inhérentes à chaque pratique artisanale, il peut être dû à la complexité du matériau vivant qu'est le bois ou encore à la grande finesse du travail de lutherie. Les simulations numériques présentées dans cet article mettent en évidence le lien entre les techniques de barrage et le comportement vibratoire de la structure. Interrogeant la robustesse des décisions fondées sur les modèles face au manque de connaissances, nous pourrions, malgré la méconnaissance relative aux techniques de barrage des facteurs, approcher leur impact sur la réponse vibratoire des tables d'harmonie en bois.

Étude par modélisation physique

Lors de leur mise en forme avec les barrages, les instruments à cordes voient leur géométrie et leur état de contrainte modifiés. Ces modifications vont engendrer une variation de leur comportement vibratoire. Or, expérimentalement, ces deux paramètres d'entrée sont indissociables. Numériquement, cette décorrélation est possible. C'est pourquoi cette étude analyse l'impact des barrages sur le comportement vibratoire d'un instrument à cordes, tout en se donnant pour but de séparer l'impact de la géométrie de l'état de contrainte résultant.

Plusieurs configurations ont été étudiées et comparées à une configuration (0) de référence constituée d'une table plate dans un état de contrainte nul :

- Une configuration où la table présente à la fois la géométrie et l'état de contrainte résultants (configuration I).
- Une configuration où la table ne présente que la géométrie résultante et présente un état de contrainte nul (configuration II).
- Une configuration où la table est plate mais présente l'état de contrainte résultant (configuration III).

Par ailleurs, deux étapes seront modélisées et étudiées séparément. La première simule la mise en forme de la table avec la barre. La seconde simule la remise à plat de la table d'harmonie lors du collage de cette dernière sur le corps de l'instrument. Une illustration est proposée sur la figure suivante (fig. 7).

Analyse des résultats

Afin d'alléger la lecture, seuls les résultats obtenus concernant la quatrième méthode d'assemblage table-barre sont présentés en détail. Les principales observations portant sur les autres méthodes sont exprimées par la suite.

L'évolution de la réponse vibratoire de la table barrée, en fonction de la courbure de la barre et de la contreforme après mise en forme pour les trois configurations I, II et III, est présentée dans la figure suivante (fig. 8).

Excepté pour les deux premiers modes propres¹⁵, les variations des fréquences propres sont faibles et inférieures à $< 2\%$. Les variations des fréquences propres pour la configuration II (géométrie résultante uniquement) sont très proches de celles obtenues avec la configuration I. Au regard de ces simulations, il apparaît que les variations significatives des fréquences propres sont principalement pilotées par la géométrie résultante de la mise en forme de la table avec la barre.

Une étude analogue est réalisée après collage sur l'instrument (après remise à plat). Les simulations résultantes sont présentées à travers la figure suivante (fig. 9). On note d'une part que les configurations I et III présentent des variations plus importantes que la configuration II, et d'autre part que ces variations sont nettement plus importantes après remise à plat de la table barrée en comparaison avec l'étude précédente. Enfin les configurations I et III étant analogues d'un point de vue comportemental, il est raisonnable de conclure à une influence bien plus significative de l'état de contrainte, résultant de la remise à plat, sur les harmoniques, alors que la fréquence propre du mode 1 est plutôt le résultat d'un compromis de la géométrie et de l'état de contrainte résultants.

Ce type de comportement a été confirmé par les simulations sur la deuxième méthode d'assemblage. Cependant les simulations obtenues pour les première et troisième méthodes montrent qu'il est plus difficile de décorrélérer l'effet de la géométrie de l'effet de l'état de contrainte résultants, les variations en fréquence pouvant varier jusqu'à 35% pour le jeu maximum de 6 millimètres pour la première méthode.

Conclusion

Objet d'usage tout autant qu'objet d'art, l'instrument de musique subit tout au long de sa vie de multiples transformations. Son histoire matérielle et ses transformations structurelles, liées à ses valeurs d'usage, souvent complexes, sont rarement bien déchiffrées. L'analyse de l'état

de conservation et l'histoire de la restauration confirment que le désassemblage des tables d'harmonie est une pratique courante depuis le début du XIX^e siècle au moins¹⁶. L'approche par la mécanique de l'instrument de musique montre ici toute sa pertinence, en traquant dans les gestes des facteurs des paramètres significatifs sur l'état de l'objet. Elle permet d'y déchiffrer des valeurs techniques historiques qui échappent au regard traditionnellement porté sur ces objets du patrimoine.

La méthodologie présentée, qui s'appuie sur la méthode V&V déjà couramment utilisée dans le monde industriel, permet de quantifier le pronostic de mise en état de jeu des instruments de musique du patrimoine, ou plus largement, de tout objet historique soumis à des efforts mécaniques. L'apport de cette méthode réside dans la quantification de l'influence des méconnaissances que nous pouvons avoir sur des objets qui ont traversé les ans. Les premiers résultats vont à l'encontre des intuitions, puisqu'ils démontrent que les aspects géométriques pilotent les comportements statiques et dynamiques de l'instrument de musique à corde aux dépens des propriétés matériaux.

Au-delà même des objectifs initiaux de la plateforme PadJeu, ce projet interroge de façon innovante le crédit que l'on peut accorder aux propriétés acoustiques et fonctionnelles actuelles d'un instrument historique. La poursuite de ces travaux offrira bientôt, nous l'espérons, des outils fiables afin de montrer aux publics du musée, en parallèle des démarches historiques et documentaires déjà largement pratiquées, si les propriétés acoustiques des instruments maintenus en état de jeu sont porteuses, ou non, d'une démarche musicale et culturelle scientifiquement validée et historiquement informée.

Ce travail a bénéficié du soutien de l'École Universitaire de Recherche PSGS HCH Humanités, Création, Patrimoine, Investissement d'Avenir ANR-17-EURE-0021 - Fondation des sciences du patrimoine.

Légendes

Fig. 1. Barrage pour différents types d'instruments de musique à cordes : violon (à gauche), archiluth (au centre) et piano (à droite). Almanza Victor. ©Musée de musique



Fig. 2. Schéma de la démarche d'aide à la décision en présence d'incertitudes basée sur un modèle numérique. Almanza Victor

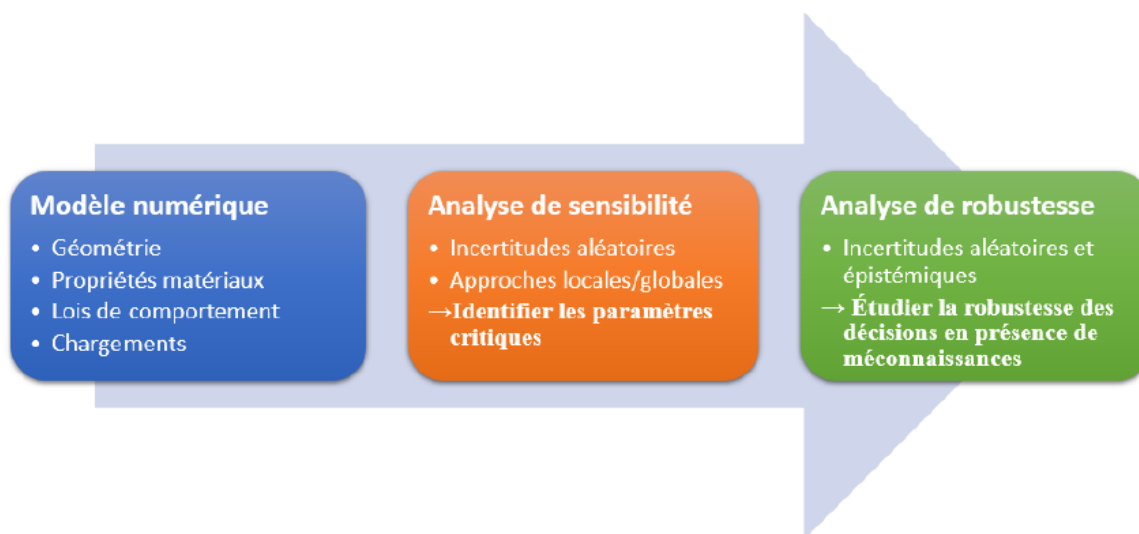


Fig. 3. Calcul sur la table d'harmonie du luth Laux Maler E.2005.3.1 de la collection du Musée de la Musique. Une zone où la contrainte fait porter à l'œuvre un risque significatif de dégradation (zone rouge) dans le cas d'une mise en état de jeu est clairement mise en évidence où barrage et chevalet se superposent. Almanza Victor

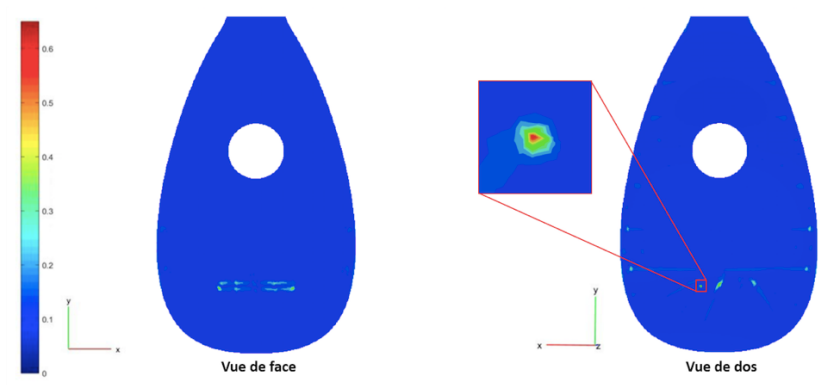


Fig. 4. Résultats des analyses de sensibilité effectuées sur la valeur maximale du critère d'endommagement (gauche) et sur les cinq premières fréquences propres de la table d'harmonie (droite) en fonction des différents paramètres du modèle. Almanza Victor

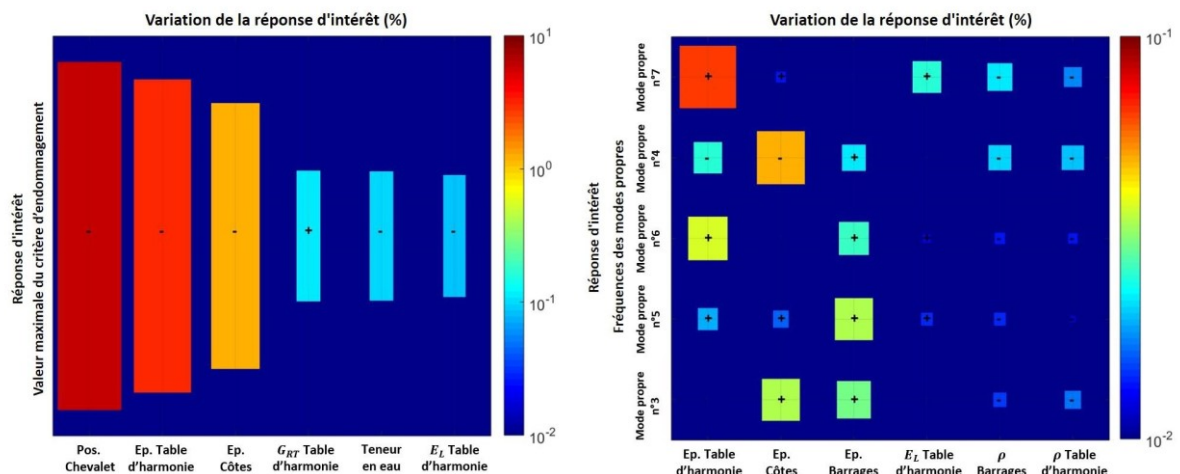


Fig. 5. Évolution du barrage des guitares : du XVII^e au XX^e siècle, leur système structural s'est extraordinairement complexifié. D'après D. Friedrich, *Citéscope : la guitare* – Cité de la musique, 1995.

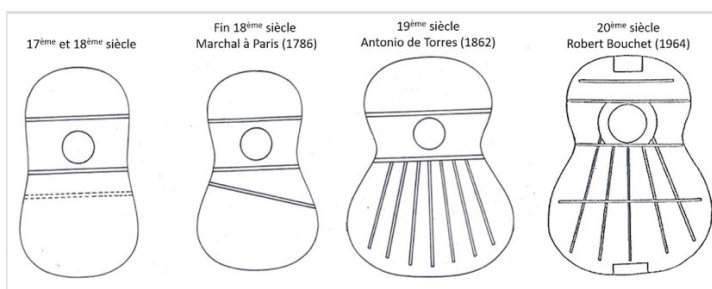


Fig. 6. Méthodes standard de barrage sur des guitares. (1) Des barres plates sont collées à une table préalablement séchée sur un plateau de travail lui-même plat. Le retour à une humidité normale produit un léger bombé. S représente le séchage de la table qui induit une diminution de sa teneur en eau, tandis que H représente la réhumidification de la table qui induit une augmentation de sa teneur en eau. (2) Des barres arrondies sont collées à une table. F représente l'effort imposé sur la table. (3) Des barres plates sont collées à une table sur un plateau de travail creux. F représente l'effort imposé sur les barres. (4) Des barres arrondies sont collées à une table sur un plateau de travail creux présentant la même courbure que les barres. F représente l'effort imposé sur les barres. Julien Colmars

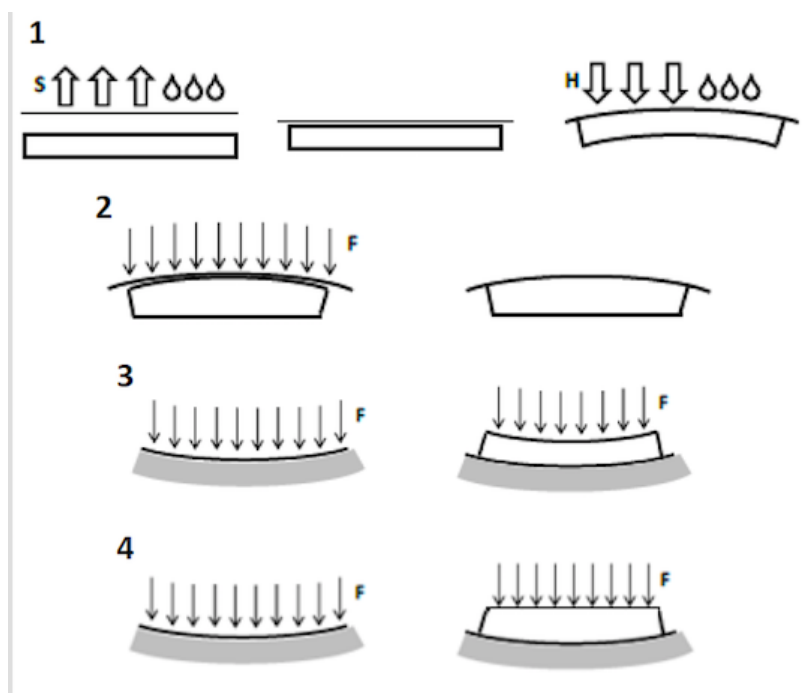


Fig. 7. Illustration des étapes de modélisation pour la méthode de barrage n°4. Avec dans un premier temps, la mise en forme de la table avec la barre, puis la remise à plat de la table sur le corps de l'instrument. Pour cette étude, le logiciel d'éléments finis ABAQUS a été utilisé pour tous les calculs statiques et analyses modales. Les post-traitements ont été effectués sous Matlab. La catégorisation de mise en œuvre a été modélisée, la table d'harmonie simulée est une plaque carrée (200*200 mm) d'épaisseur constante (3 mm). Une seule barre lui est adjointe d'une longueur de 190 mm, 7,5 mm la largeur et 15 mm de hauteur. Almanza Victor

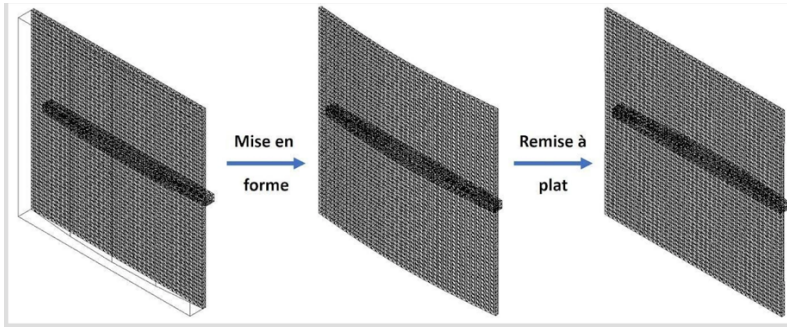


Fig. 8. Évolution de la réponse vibratoire de la table barrée en fonction de la courbure de la barre et de la contreforme après mise en forme avec à gauche celle obtenue pour la configuration I, au centre celle obtenue pour la configuration II et à droite celle obtenue pour la configuration III. En ordonnée est représentée l'évolution en fréquence des 10 premiers modes propres en fonction de la courbure de la barre et de la contreforme. Almanza Victor

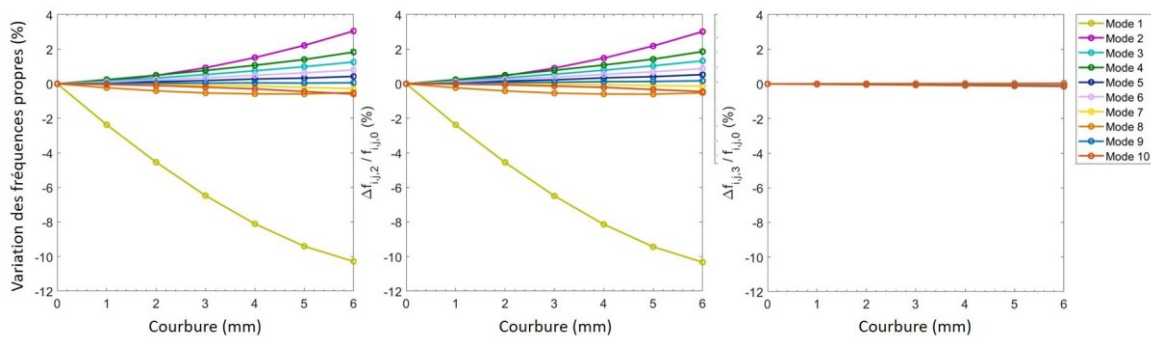
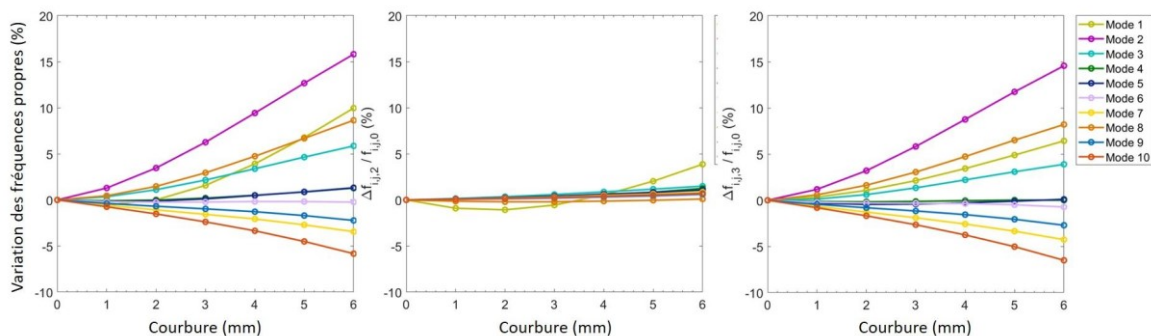


Fig. 9. Évolution de la réponse vibratoire de la table barrée en fonction de la courbure de la barre et de la contreforme après remise à plat avec à gauche celle obtenue pour la configuration I, au centre celle obtenue pour la configuration II et à droite celle obtenue pour la configuration III. En ordonnée est représentée l'évolution en fréquence des 10 premiers modes propres en fonction de la courbure de la barre et de la contreforme. Almanza Victor



Bibliographie

Addressi D., Lacarbonara W., Paolone A., 2005, “On the linear normal modes of planar prestressed curved beams”, *Journal of Sound and Vibration* 284, p. 1075-1097.

Colmars J., Le Conte S., Vion M., Clarke C., Marconi E., *Actes du colloque Sciences des matériaux du patrimoine culturel – 2 (20 et 21 novembre 2012)*, ministère de la Culture et de la Communication, Paris, 2012.

Dall’Asta A., Leoni G., 1999, “Vibrations of beams prestressed by internal frictionless cables”, *Journal of Sound and Vibration* 222, p. 1-18.

Guide for verification and validation in computational solid mechanics, 2006, American Society of Mechanical Engineers.

Guitard D., 1987, *Mécanique du matériau bois et composites*, Éditions Cépaduès.

Hill R., 1948, *A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals*, Proceedings of the Royal Society of London, A 193, p. 281-297.

Le Conte S., Le Moyne S., Ollivier F., Vaiedelich S., 2012, “Using mechanical modelling and experimentation for the conservation of musical instruments”, *Journal of Cultural Heritage* 13, S161-S164.

Le Moyne S., Le Conte S., Ollivier F., Frelat J., Battault J.-C., Vaiedelich S., 2012, “Restoration of a 17th-century harpsichord to playable condition: A numerical and experimental study”, *The Journal of the Acoustical Society of America* 131, p. 888-896.

Navi P., Heger F., 2005, *Comportement thermo-hydrromécanique du bois : Applications technologiques et dans les structures*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.

Raju K. K., Rao G. V., 1986, “Free vibration behavior of prestressed beams”, *Journal of Structural Engineering* 112, p. 433-437.

Sève B., 2013, *L’instrument de musique : une étude philosophique*, L’Ordre philosophique – Seuil.

Vaiedelich S., Fritz C., 2017, “Perception of old musical instruments”, *Journal of Cultural Heritage* 27, S2-S7.

Vaiedelich S., Laloue C., Frelat J., Battault J.-C., 2007, « Maintenir en état de jeu : le cas du clavecin de I. Couchet, Anvers 1652 », *Technè*, p. 74-78.

Vaiedelich S., Marconi E., *Le violon en France du XIXe siècle à nos jours (25 et 26 mars 2015)*, Conservatoire à Rayonnement Régional de Paris, Paris, 2015.

Documents inédits

Mamou-Mani A., 2007, *Précontraintes et vibration des tables d'harmonie : vers une modélisation du savoir-faire des fabricants d'instruments de musique*. PhD Thesis, Besnainou C., Frelat J., Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.

Viala R., 2018, *Towards a model-based decision support tool for stringed musical instruments making*, PhD Thesis, Cogan S., Placet V., Université Bourgogne Franche-Comté.

Notes

¹ Sève, 2013. Vaiedelich, Fritz, 2017, p. 2-7.

² Vaiedelich *et al.*, 2007, p. 74-78. Le Conte *et al.*, 2012, p. 161-164. Le Moyne *et al.*, 2012, p. 888-896.

³ On se réfère ici à l'instrumentarium occidental. Les instruments extra-européens requièrent à notre sens une réflexion plus large qui reste à mener.

⁴ Soutenu par la Fondation des sciences du patrimoine et la Région Île-de-France, ce projet est porté par le Musée de la musique, qui a un rôle d'animation et de recherche dans le domaine de la musique et de ses instruments (décret du 15 décembre 2015 concernant le musée de la Musique, intégré à l'établissement public Cité de la musique-Philharmonie de Paris). Le laboratoire FEMTO de l'Université de Franche-Comté, spécialiste en mécanique, et le laboratoire SATIE de CY Cergy Paris Université, spécialisé dans la mise en œuvre d'outils de contrôle non-destructifs, sont également impliqués dans le projet.

⁵ American Society of Mechanical Engineers, 2006.

⁶ Un critère d'endommagement, ou critère de plasticité, est défini comme étant un critère permettant de savoir, sous des sollicitations données, si une pièce se déforme plastiquement ou si elle reste dans le domaine élastique, c'est-à-dire si elle retrouve sa forme d'origine après avoir été déformée.

⁷ Hill, 1948.

⁸ Le processus de minimisation consiste à minimiser une fonction-objectif. Ici la fonction-objectif représente les différences entre les résultats numériques et expérimentales.

⁹ Guitard, 1987. Navi, Heger, 2005. Viala, 2018.

¹⁰ Quelles que soient les familles instrumentales, on peut estimer que l'effort appliqué par les cordes en newton représente environ 10 fois la masse de l'instrument en kg. Ainsi, un effort de 2 tonnes est appliqué sur un piano moderne à queue, dont la masse ne dépasse que rarement 200 kg.

¹¹ Mamou-Mani, 2007. Colmars, 2012, p. 4.

¹² Raju, Rao, 1986, p. 433-437. Dall'Asta, Leoni, 1999, p. 1-18. Addressi *et al.*, 2005, p. 1075-1097.

¹³ Mamou-Mani, 2007.

¹⁴ Colmars, 2012, p. 4.

¹⁵ Les fréquences propres sont certaines fréquences auxquelles un système est susceptible de vibrer. Lorsqu'elle vibre à une certaine fréquence propre, une structure se déforme en une forme correspondante, le mode propre.

¹⁶ Vaiedelich, Marconi, 2015.