

Modélisation mécanique et holographie acoustique : application à la restauration et à la conservation du clavecin Ioannes Couchet (Inv. E.2003.6.1)

Sandie Le Conte, ingénieur de recherche, Laboratoire, Musée de la musique, Paris.

Sylvie Le Moyne, chercheur, Institut Jean LeRond d'Alembert, Paris

Le Musée de la musique a acquis récemment un clavecin de Ioannes Couchet, fabriqué en 1652 à Anvers. Son intérêt historique et son état de conservation en ont fait un instrument exceptionnel pour lequel un maintien en état de jeu a été envisagé. Hormis les analyses « classiques » de l'objet, un outil spécifique, la modélisation mécanique par la méthode des éléments finis, a été mis en place afin d'apporter une simulation de l'état mécanique de l'instrument. Cet outil a permis de valider et d'optimiser les choix d'intervention en combinant différentes simulations au savoir-faire du restaurateur. Afin de recalibrer le modèle, le clavecin a été instrumenté de façon non intrusive grâce à l'holographie acoustique en champ proche. Cette technique consiste à enregistrer les vibrations de la table d'harmonie, en réponse à un impact, grâce à une antenne de microphones positionnée au-dessus des cordes. Réalisée périodiquement cette mesure pourrait permettre une évaluation du vieillissement de la structure.

Mechanical modelization and holography measurement: application to the restoration and conservation of the Ioannes Couchet harpsichord (Inv. E. 2003.6.1)

The Musée de la musique (Paris) has recently acquired a harpsichord made by Ioannes Couchet in 1652 in Antwerpen. As a rare masterpiece many challenging problems were to be confronted when its restoration was decided in favour of returning the instrument again to playing condition. The contribution of the numerical modelization, based on the finite elements method is important to anticipate the restoration, and understand the vibration properties.

The different solutions for the restoration can be added in the model. The results coupled with the know-how of skilled harpsichords restorers have allowed, first, deciding for one restoration protocol, satisfying both in playability and conservation aspects. In a second time, the instrumentation of the harpsichords can be realized, a non-intrusive technique which directly measures acoustical pressure radiated by the vibration soundboard was applied, called near field acoustical holography. This experiment could be conducted regularly enable the diagnosis of the ageing of the mechanical state of constituent elements.

I Introduction

Un clavecin est une structure mécanique complexe pour laquelle il est possible de calculer, grâce à un modèle mécanique simplifié, les contraintes imposées par la tension des cordes et/ou les variations hygrométriques. En effet, l'apport de la modélisation mécanique par éléments finis est important pour évaluer les effets du climat sur la structure, anticiper les restaurations, mais aussi pour comprendre le comportement vibratoire de la structure. Il est possible de simuler différents scénarios de restauration afin de choisir le meilleur compromis entre la jouabilité de

l'instrument de musique et la conservation de l'objet patrimonial, au regard des résultats de la simulation et en concertation avec le savoir faire du facteur.

Après la phase de simulation, le clavecin peut être instrumenté afin de valider le modèle en mesurant les paramètres dynamiques de la table d'harmonie, c'est-à-dire les propriétés vibratoires. Nous avons eu recours pour cela à une technique non intrusive qui mesure directement le champ de pression rayonné par la vibration de la table d'harmonie en réponse à une sollicitation. Il s'agit de l'holographie acoustique en champ proche (INAH) qui permet le calcul, par une méthode inverse, de la déformation de toute la table d'harmonie à partir de la mesure du champ proche acoustique mesuré sans contact. Cette expérience apporte de plus une meilleure compréhension de l'instrument permettant d'améliorer le modèle, qui demeure une simplification de la réalité. En terme de conservation, cette expérience pourrait être menée régulièrement pour détecter des variations d'état mécanique des différents éléments constitutifs de l'instrument, puisque toute modification de la structure vibrante entraîne une variation de la réponse acoustique de l'instrument.

II La modélisation numérique : un outil pour la restauration

Lorsque le Musée de la musique a fait l'acquisition du clavecin Couchet en 2001, bien qu'encore cordé, sa table d'harmonie présentait de nombreux dommages (notamment des fractures). Pour la restaurer les cordes devaient être enlevées. Les questions étaient alors les suivantes : le bois était-il encore dans son domaine d'élasticité ? Allait-il supporter de nouveau les efforts associés aux tensions des cordes après recordage pour sa remise en état de jeu ? Pour répondre à ces questions, un modèle mécanique du clavecin a été développé, basé sur la technique des éléments finis puis le résultat de la simulation a été comparé à une mesure de relaxation de la table d'harmonie obtenue lors du décordage de l'instrument.

II.1 Définition du modèle

La première étape dans la définition du modèle mécanique est le relevé géométrique de l'instrument. Les éléments extérieurs tels que la table d'harmonie, les chevalets (2 jeux de 8 pieds, plus celui de 4 pieds), les cordiers et le sommier sont mesurés précisément pour prendre en compte leur courbure. Une radiographie de l'instrument a par ailleurs été faite pour positionner et mesurer les éléments internes que sont les huit barres de rigidité. Puis toutes les parties constitutives de la structure sont maillées avec des éléments *plaques orthotropes* (éléments DKT [1]) ou des *bars isotropes* à l'aide du logiciel de calcul par éléments finis Castem.

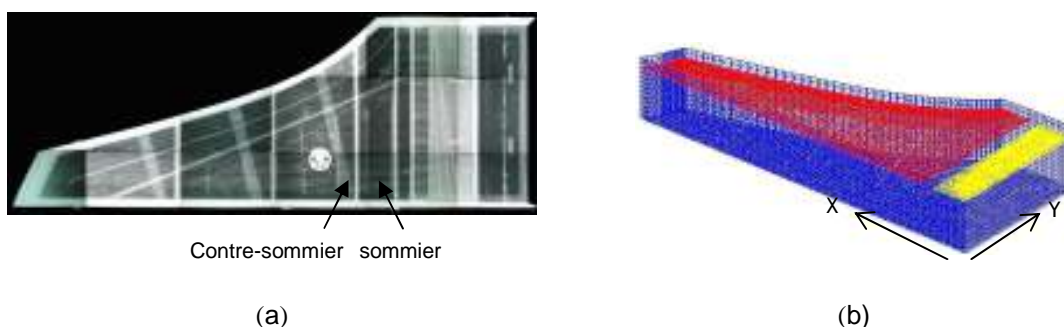


Figure 1 - Radiographie (a) et maillage (b) du clavecin Ioannes Couchet

Une fois la géométrie du problème définie, la seconde étape consiste à appliquer les forces extérieures. Ces forces sont dues à la tension des cordes. Dans le cas du clavecin Couchet, il y a 150 cordes réparties en trois jeux, ce qui induit une tension moyenne de 6700 N (~ 670 KgF) en tension longitudinale. Avant de calculer les contraintes mécaniques résultantes et les déplacements de la table d'harmonie, les propriétés élastiques des différents matériaux constitutifs de l'instrument doivent être déterminées. Une analyse xylogologique a permis d'identifier les essences de bois, en revanche, pour la densité et les modules d'élasticité, les valeurs ont été relevées dans un abaque [2]. En effet, le clavecin Couchet étant un objet du patrimoine, il n'est pas envisageable de prélever un échantillon suffisamment grand pour la détermination de ces constantes. Toutes les constantes utilisées sont définies dans le tableau 1.

Tableau 1 - Constantes élastiques des essences de bois utilisées

Element du clavecin	Essence de bois	Module d'Young (GPa)	Masse volumique (kg/m ³)
Table d'harmonie (plaque orthotrope)	épicéa	YG ₁ = 11 YG ₂ = 1.4 G ₁₂ = 1.364	400
Chevalets (barre isotrope)	érable	YG = 10	500
Sillets et sommier (plaque orthotrope)	chêne	YG ₁ = 12.5 YG ₂ = 1.9 G ₁₂ = 1.1	610
Éclisses et fond (plaque orthotrope)	peuplier	YG ₁ = 9 YG ₂ = 1 G ₁₂ = 5.5	410
Arc-boutants et contre sommier (barre isotrope)	peuplier	YG = 9	410
Barres de rigidité	épicéa	YG = 11	400

Enfin, il faut définir les conditions aux limites de la table d'harmonie, c'est-à-dire les degrés de liberté sur les bords de la table. Elle sera considérée encadrée dans un premier temps, puisqu'elle est collée sur environ 1.5 cm sur sa périphérie.

II.2 Résultats du calcul

En vue de la remise en état de jeu, les premiers résultats intéressants étaient ceux concernant la mécanique statique, c'est-à-dire les contraintes et déformations de la table d'harmonie en réponse à une charge statique (la tension des cordes).

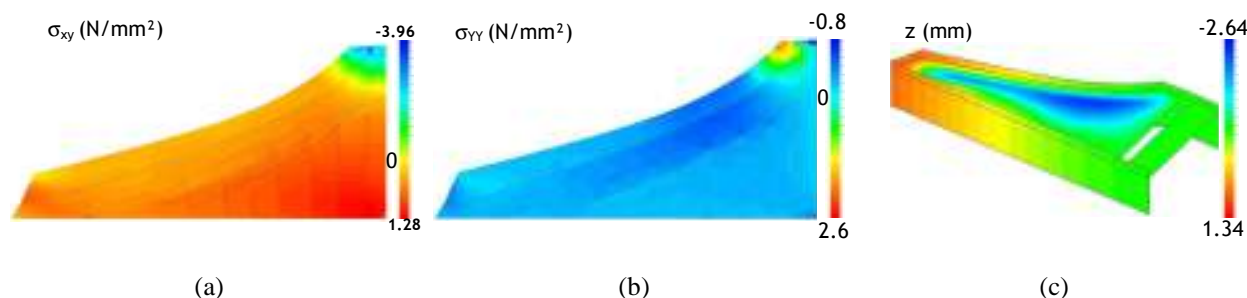


Figure 2 - Résultats du calcul sous Castem : contrainte de cisaillement (a), contrainte longitudinale (b) et déplacement (c)

La figure 2 montre que les premiers résultats de contraintes sont cohérents avec l'état de la table d'harmonie, puisque celle-ci présentait des fractures aux endroits de contraintes maximales indiqués par le modèle. D'autre part, il a été possible de comparer les résultats de la déformation verticale avec celle mesurée lors du décordage. Cette mesure a été effectuée à l'aide d'un pied à coulisse de 0.1 mm de précision. La figure 3 représente ces mesures en différents endroits de l'instrument.

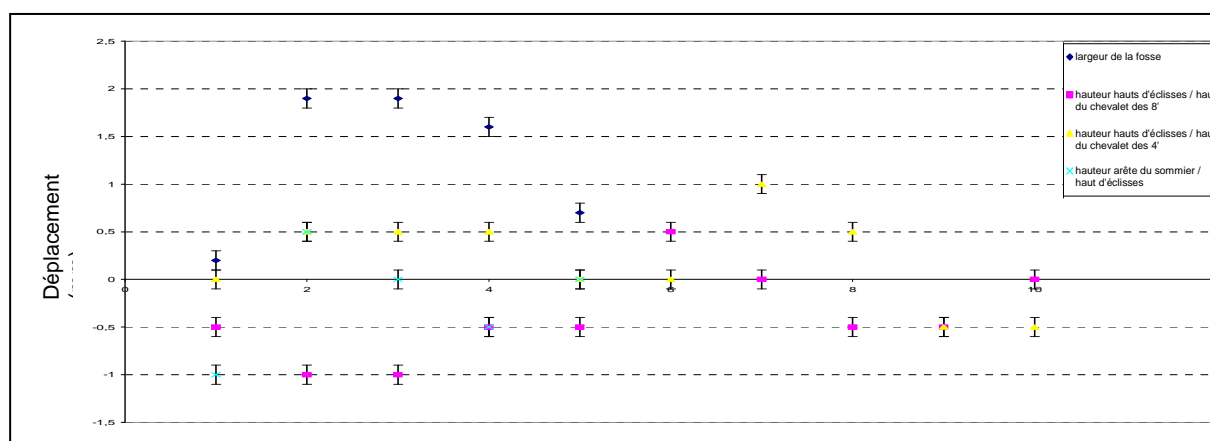


Figure 3 - Mesure des déplacements de différents points de la structure.

Cette première mesure semble valider en première approximation la modélisation mécanique du Couchet en statique. En effet, le résultat du calcul indique un déplacement vertical du même ordre de grandeur (mm) que le déplacement du haut du chevalet par rapport à l'éclisse (carrés roses sur la figure 3).

Ainsi validé, il est possible d'utiliser le modèle pour simuler le comportement de la structure en réponse à des variations hygrométriques, ou pour optimiser la restauration.

II.3 Application du modèle à la restauration

Le modèle a été utilisé pour simuler différents scénarios de restauration. Une partie de la restauration consistait à limiter l'avancée du contre-sommier vers le sommier, cette avancée résultant de la tension des cordes imposée. Pour stabiliser ce déplacement les restaurateurs ont l'habitude d'utiliser des entretoises, petits renforts

maintenus en compression entre le contre-sommier et le sommier. Le modèle a donc été agrémenté d'éléments poutre en laiton. La simulation a été réalisée pour des nombres différents d'entretoises (2, 3, et 5), ainsi que pour des répartitions différentes le long du sommier (dans la configuration 3 renforts). En effet, une répartition homogène le long du sommier a été comparée à une répartition dissymétrique (1 entretoise du côté des basses, et 2 du côté des aigus) puisque la contrainte présentait un gradient important dans les aigus. On s'intéresse au calcul de la contrainte de cisaillement, puisque c'est cette dernière qui est la principale responsable des fractures.

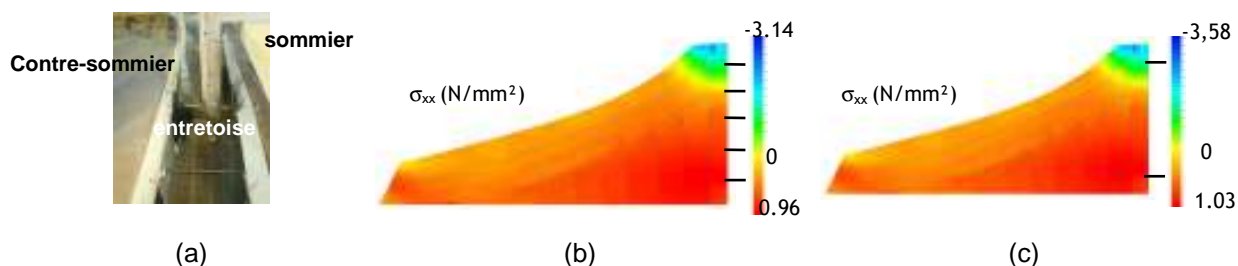


Figure 4 - Modélisation de l'ajout d'entretoise (a), contrainte de cisaillement pour 5 entretoises (b) et pour 2 (c)

La figure 4 représente à gauche la pose d'entretoises sur le clavecin, et les deux figures (4b et 4c) représentent la répartition de la contrainte de cisaillement dans la table d'harmonie après l'ajout d'entretoises (petits traits noirs). Il apparaît clairement que plus on ajoute d'entretoises, plus on réduit la contrainte de cisaillement. Il s'agit de trouver alors le meilleur compromis entre consolidation et liberté de mouvement de la table d'harmonie. En effet, si elle est trop bloquée par les entretoises, ne risque-t-on pas de perturber la fonction sonore de l'instrument ? S'appuyant sur le savoir faire du facteur qui aurait mis 3 entretoises, la répartition des renforts a été étudiée.

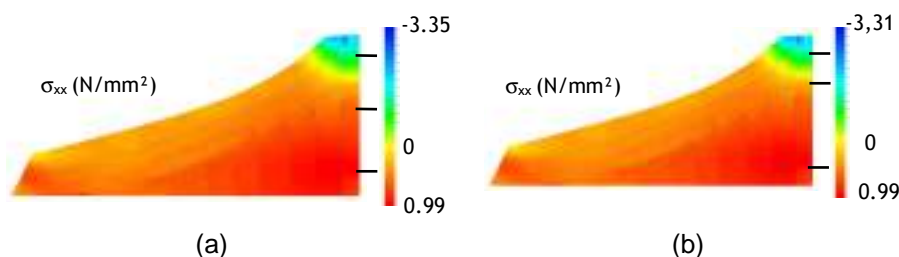


Figure 5 - Effet de la position des entretoises le long de la table d'harmonie

La figure 5 montre que pour un même nombre d'entretoises (3), le fait de répartir non uniformément ces renforts permet de réduire encore la contrainte de cisaillement. C'est donc cette configuration qui a été choisie pour la pose de renfort par le restaurateur.

III Analyses dynamiques

En plus de son caractère patrimonial, le clavecin est avant tout un instrument de musique avec sa fonction sonore. Cette fonction est essentiellement produite par la table d'harmonie et résulte de sa vibration. À partir de la mesure des vibrations de la

table d'harmonie, est-il possible de détecter des fissures, ou d'estimer le vieillissement de la structure ? Tronchin [3] a tenté de différencier deux tables d'harmonie de deux clavecins différents, mais par analyse modale expérimentale, ce qui impose le collage d'un réseau de capteurs sur la structure. Concernant la conservation d'une œuvre muséale, c'est l'holographie acoustique qui a été appliquée sur l'instrument. Cette technique présente le grand intérêt pour les objets du patrimoine d'être quasi-non intrusive. La mesure permet également de valider le modèle, et réciproquement, un premier modèle peut aider à l'optimisation de la mesure.

III.1 Résultat du modèle

Le modèle, en dynamique, c'est-à-dire, en analyse vibratoire, permet de calculer les déformations de la table d'harmonie lorsqu'elle est excitée par un choc ponctuel (qui remplace la vibration des cordes). Les résultats présentés tiennent compte des entretoises, des éléments décrits dans la présentation du modèle, et prennent pour hypothèse que la table d'harmonie est bloquée sur sa périphérie. Les 5 premiers modes sont représentés sur la figure 6.

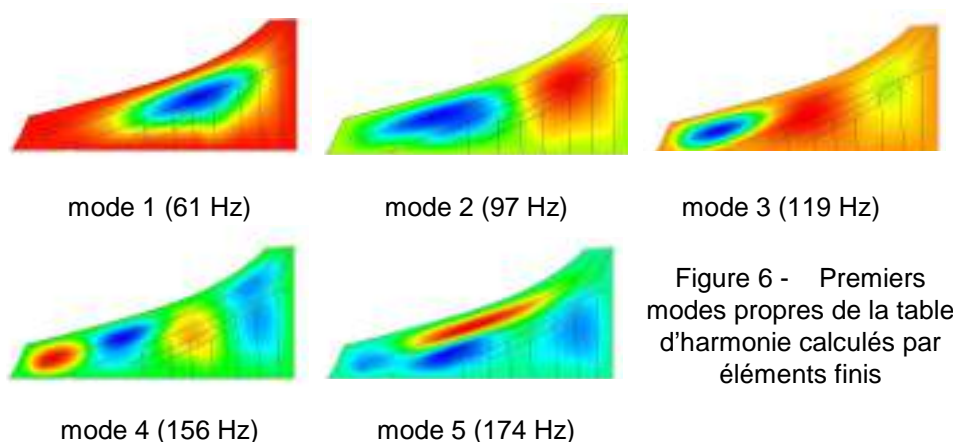


Figure 6 - Premiers modes propres de la table d'harmonie calculés par éléments finis

Ce premier résultat permet, en première approximation de localiser les zones nodales de la table d'harmonie.

III.2 Holographie acoustique en champ proche : un outil de cartographie non intrusif

III.2.1 Principe

L'holographie acoustique est une technique de mesure permettant de réaliser l'analyse modale de structure. Le principe est décrit précisément dans l'article de Ollivier et al. [4].

Une antenne de microphones acoustiques enregistre le champ de pression généré par la vibration de la structure après excitation. La réponse impulsionnelle est obtenue grâce à un choc ponctuel de la structure. Le comportement vibratoire de la structure est alors déduit en terme de vitesse normale de vibration grâce à une méthode de calcul inverse basée sur la transformée de Fourier inverse spatiale à 2 dimensions. C'est-à-dire qu'à partir de l'enregistrement de la pression acoustique, on

peut calculer le déplacement de la structure qui a généré ce champ de pression. Cette méthode présente certains avantages, non des moindres, dans le cas de structures fragiles comme les objets du patrimoine :

- elle est non invasive (excepté l'excitation) et non destructive, comparée à l'analyse modale expérimentale qui utilise des accéléromètres (petits capteurs d'accélération) directement collés sur la structure.
- Le nombre d'impacts excitateurs est beaucoup moins grand que pour la vibrométrie laser (méthode de mesure optique sans contact) pour laquelle à un point de mesure correspond un impact. La configuration d'holographie utilisée au Musée permet de mesurer le champ de pression en 120 points simultanément avec le même impact

III.2.2 Dispositif expérimental

Puisque la mesure repose sur l'enregistrement du champ de pression acoustique, celle-ci a été effectuée dans la chambre semi-anéchoïque de la Cité de la musique. L'intérêt d'une telle pièce est que les sons sont fortement atténués, limitant la contribution des ondes réfléchies sur les parois. Le second intérêt de réaliser la mesure dans cet environnement est que l'intensité de l'impact peut être réduite permettant d'augmenter d'autant le rapport signal sur bruit.

L'instrument étant sous tension (cordes tendues), et un décordage ne pouvant être envisagé, les cordes ont été étouffées de manière à minimiser leur contribution au champ acoustique global (figure 7).

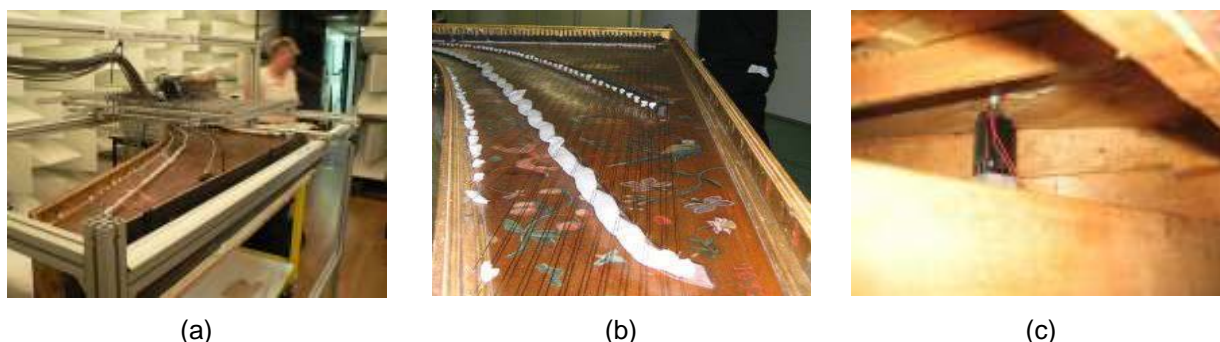


Figure 7 - Dispositif expérimental d'holographie acoustique: (a) antenne de microphones acoustiques, (b) extinction des cordes (c) marteau d'impact

L'impact est donné par un marteau électromagnétique qu'il a été possible de positionner à l'intérieur de la caisse de l'instrument, ce qui permet de ne pas marquer le décor de la table s'il présentait une faiblesse. Ce marteau permet d'avoir un impact répétitif pour toutes les mesures. Le marteau a été positionné non loin d'un ventre de vibration de la table (déterminé au préalable grâce à la modélisation).

L'antenne de microphones est composée de 12 x 10 éléments (120 au total) espacés de 50 mm. Pour couvrir l'entièreté de la table d'harmonie, l'antenne a été décalée selon 8 positions. Pour chacune de ces positions, un micro-positionnement est possible selon 16 positions permettant d'obtenir un pas de mesure spatial de 12.5 mm (figure 8). Chacun des 120 microphones enregistre et transmet la mesure à une chaîne d'acquisition à laquelle est également relié un accéléromètre, collé sur le chevalet 4 pieds, qui permet de caler les phases (origine temporelle des signaux).

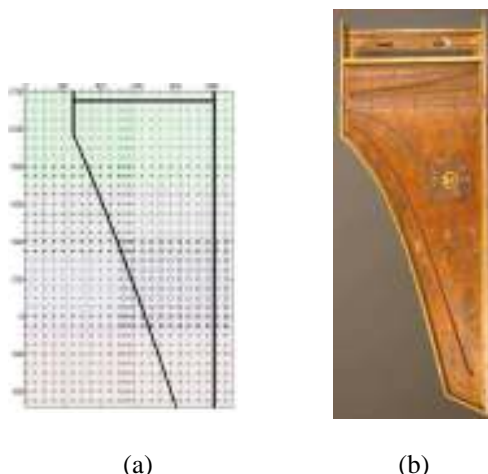


Figure 8 - Positionnement de la grille de mesure

Le champ acoustique est donc mesuré dans un plan parallèle à celui de la table d'harmonie, à une distance de 72 mm (compte tenu de la hauteur des éclisses, il n'était pas possible de se rapprocher davantage) ce qui commence à être une distance importante pour l'holographie acoustique. L'ensemble des acquisitions, pour couvrir la table d'harmonie donne un panel de 13348 échantillons.

III.2.3 Résultats expérimentaux

La distribution des vitesses de vibration de la table est calculée par méthode inverse, à partir du champ de pression mesuré par l'antenne rectangulaire. Une description précise du processus est donnée dans l'ouvrage de Williams [5]. Les formes des modes obtenus sont représentées dans la figure 9. La méthode nous a permis de reconstituer des modes jusqu'à 1000 Hz. Pour valider la méthode, seuls les premiers modes seront étudiés.

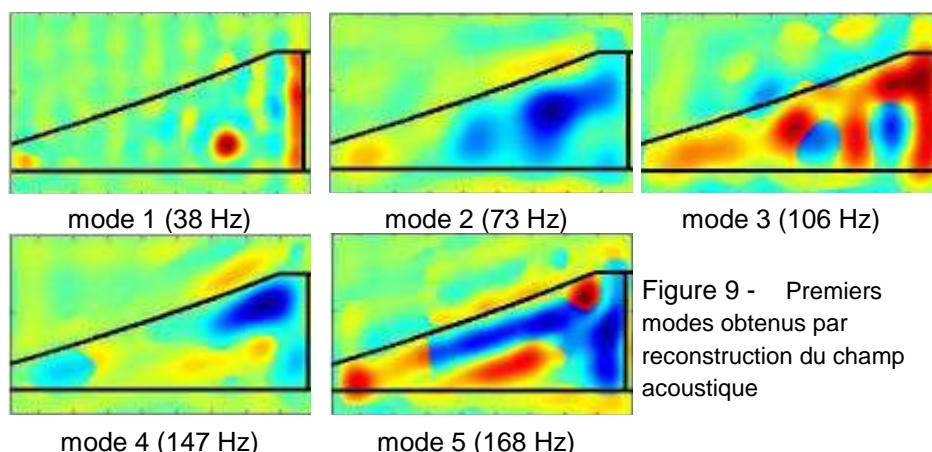


Figure 9 - Premiers modes obtenus par reconstruction du champ acoustique

III.3 Analyse des résultats

La reconstitution des déformées modales grâce à l'holographie permet de valider ou d'invalider les hypothèses faites dans la modélisation. En effet la table étant collée sur sa périphérie, elle a été, en première approximation, bloquée selon tous les

degrés de liberté (encastrée). Or on remarque que les modes mesurés sont différents tant en forme (déformées modales) qu'en fréquence. Plus particulièrement, le mode 1 mesuré présente une vitesse maximale sur la partie de table qui est collée sur le contre-sommier. Les autres modes mesurés apparaissent à des fréquences plus basses que ceux calculés avec la première hypothèse. L'hypothèse d'encastrement de toute la périphérie de la table d'harmonie est sûrement trop forte par rapport à la réalité. Une seconde hypothèse est donc émise dans le modèle, considérant cette fois-ci, la partie de la table collée sur le contre-sommier comme libre. Les résultats de cette nouvelle simulation sont donnés dans la figure 10.

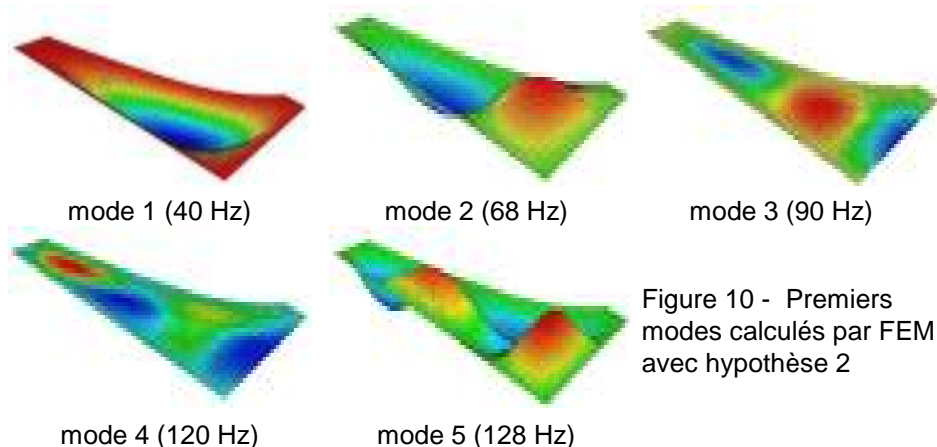


Figure 10 - Premiers modes calculés par FEM avec hypothèse 2

Il apparaît clairement que les modes calculés se rapprochent plus de la mesure. En effet, les fréquences propres sont plus basses. La comparaison entre le résultat du modèle et de la mesure nous permet de réfuter l'hypothèse d'encastrement sur toute la périphérie de la table d'harmonie.

III.4 Perspective de conservation préventive

Une structure peut se définir par sa réponse modale. En effet, toute modification de la structure entraîne une modification de cette réponse. Le vieillissement des matériaux, les fissures de la structure peuvent être considérés comme des modifications de la table d'harmonie. Les premières mesures d'holographie ont montré la faisabilité de cette mesure pour caractériser la structure vibrante malgré les difficultés de mise en œuvre sur un tel objet (distance de l'antenne à la structure vibrante, réalisation du choc le moins intrusif). Il paraît donc intéressant de renouveler à intervalle de temps régulier la mesure pour estimer et anticiper le vieillissement du clavecin maintenu en état de jeu.

IV Conclusion

Le développement d'un outil de modélisation mécanique, en concertation avec tous les acteurs de la restauration conservation a permis d'évaluer l'état mécanique de la structure, et de choisir la restauration mécaniquement la plus cohérente. Le recours à une mesure non destructive a permis de valider le modèle pour d'autres utilisations, et permet d'envisager l'utilisation de cette technique, de mise en œuvre relativement simple, pour la conservation préventive des objets du patrimoine.

Bibliographie

- [1] Batoz, J.-L., Dhatt, G., *Modélisation des structures par éléments finis*, Hermes, 1990.
- [2] Bucur, V., *Acoustics of wood*. Springer second edition, 2006.
- [3] Tronchin, L., Cocchi, A. and Consani, C., *Vibrational and acoustical radiation in two Italian harpsichords of 17th century*. Proceedings of ISMA 2001.
- [4] Ollivier, F., Alais, P., Karkaletsis, A., *Fast modal analysis by means of impulse acoustical holography*, Proceedings of the 11th ICSV 2004, pp 2395-2402.
- [5] Williams, E.G., *Fourier Acoustics. Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography*, Academic Press, 1999.

Biographie

Sandie Le Conte est ingénieur de recherche au Laboratoire du Musée de la musique depuis 2005. Son principal projet de recherche, qui fait l'objet d'un Projet national de Recherche du Ministère de la Culture, porte sur le vieillissement du bois en s'intéressant à ses propriétés viscoélastiques. Elle intervient par ailleurs en mesures physiques pour aider à la compréhension du fonctionnement des instruments et développer des outils de mesure non destructifs pour la conservation préventive de ces instruments. Ingénieur en vibration et docteur en acoustique (sous-marine), ses travaux de thèse portaient sur une approche multi-échelle et multi-mesure de l'interaction onde-matériau.