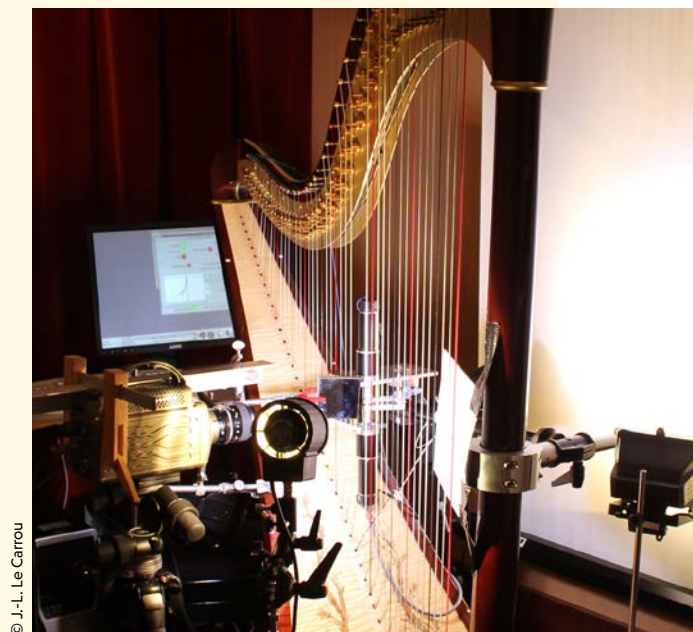


tel modèle à l'aide d'une caméra rapide et validé par un doigt robotisé paramétrable (voir la figure ci-contre). Les déplacements du doigt et de la corde au cours du pincement ainsi mesurés, nous avons estimé les paramètres de l'interaction qui varient selon les instrumentistes, rendant compte de certaines différences acoustiques que l'on peut percevoir entre les musiciens. Là encore, le modèle physique permet d'éclairer le fonctionnement de l'instrument. Du point de vue de l'instrumentiste, le pincement ne s'arrête pas au bout de son doigt, c'est tout son corps qui y participe. Pour mettre en évidence les stratégies gestuelles des harpistes, nous avons analysé les mouvements de leurs membres et de leur corps par Motion Capture. Nous avons notamment

pu montrer que le mouvement du poignet (lui aussi très répétable et spécifique de chaque instrumentiste) participe grandement à l'interprétation. Avec l'aide d'un modèle biomécanique du bras des harpistes, nous avons pu constater que les efforts articulaires développés par les instrumentistes pouvaient se répartir différemment le long du bras en fonction de l'expertise des instrumentistes et qu'ils s'avèrent très importants, notamment au niveau de l'épaule. Une modélisation du mouvement des instrumentistes couplée à celle de l'instrument peut aider à faire évoluer, à terme, la pratique instrumentale et l'ergonomie de l'instrument pour limiter, par exemple, l'apparition de certaines pathologies.



© J.-L. Le Carrou

renseignements, il peut diagnostiquer les notes donnant lieu à un son de forte amplitude, mais s'atténuant rapidement (couplage fort) ou un son d'amplitude plus faible, mais durant plus longtemps (couplage faible). Cette caractéristique, importante pour le musicien, est ainsi mesurée objectivement par des paramètres physiques pertinents.

Le luthier influe sur la carte d'admittance, sans le savoir, en modifiant la géométrie de la table et par le choix des matériaux. La trajectoire est quant à elle fixée par les fréquences de jeu et les positions des points d'accrochage.

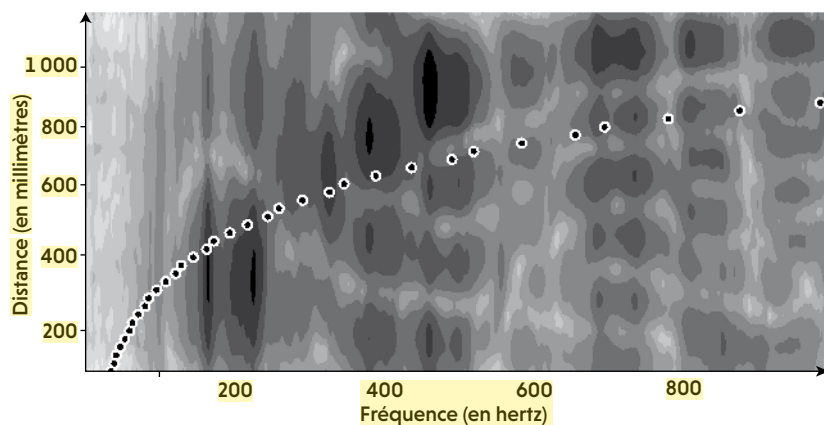
Le physicien Chris Waltham, de l'université de Vancouver, au Canada, a développé une interprétation physique de cette carte d'admittance. La table d'harmonie est moins épaisse près de la console qu'à proximité du pied de la

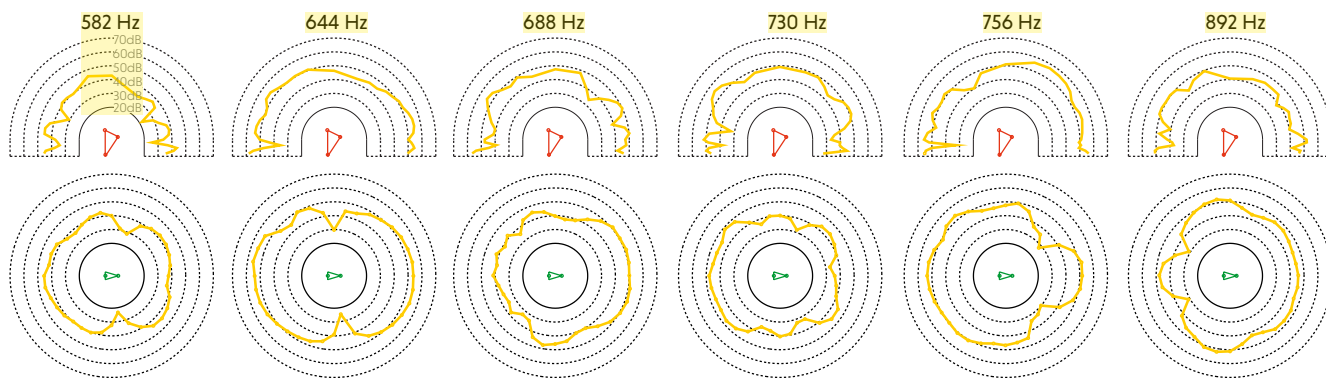
colonne. C'est pourquoi, parmi les « ventres » des différents modes de flexion de la table (les régions pour lesquelles le champ vibratoire de ce mode est maximal), celui qui est dans la partie supérieure de l'instrument (la plus souple) a une amplitude supérieure à celle de ses voisins. Ce ventre, plus marqué que les autres, est d'autant plus haut sur l'instrument que l'ordre de ce mode est élevé.

DE L'UTILITÉ DES MONOPOLES

La carte d'admittance met en évidence ce résultat : quand la fréquence augmente, le nombre de ventres visibles augmente (un ventre pour une fréquence de 200 hertz et six à 850 hertz), les régions pour lesquelles l'admittance est la plus élevée (les régions noires de la carte ci-contre) correspondant aux ventres de grande amplitude. Du point de vue acoustique, ce phénomène a une conséquence importante en termes de directivité : plus la fréquence augmente plus le rayonnement acoustique de l'instrument présentera une certaine complexité avec de nombreux lobes de forte pression. Ce rayonnement acoustique de l'instrument peut être décrit à l'aide de sources élémentaires équivalentes nommées monopoles acoustiques. La répartition dans l'espace de ces monopoles révèle les zones actives de l'instrument, c'est-à-dire les sources acoustiques du système. Les études menées dans notre laboratoire montrent que les sources acoustiques équivalentes à l'instrument se déplacent vers sa partie supérieure et augmentent avec la fréquence.

La carte d'admittance d'une table d'harmonie de harpe décrit le degré de couplage entre cordes et table (plus il est fort, plus la zone est noire), qui dépend de la fréquence et de la position sur l'axe de l'instrument. Chaque corde est représentée par un point, dont l'abscisse est la fréquence fondamentale de la corde et l'ordonnée la position de son point de fixation.





Mais que se passe-t-il à plus hautes fréquences, lorsque les modes ne sont plus discernables ? À partir de la carte d'admittance, il est possible d'exprimer un niveau moyen de couplage qui nous a permis d'identifier des stratégies différentes de fabrication des facteurs de harpes. Certains privilégient une faible mobilité de la table d'harmonie et de la caisse tandis que d'autres font l'inverse. Ces choix ont une conséquence sur l'acoustique des instruments, entraînant, *in fine*, des spécificités sonores propres à chaque fabricant. Nous avons aussi pu montrer qu'en suivant la production de deux grandes familles de facteurs du XVIII^e et XIX^e siècle (la famille Cousineau et la famille Erard), leurs stratégies de fabrication ont évolué au cours des années allant vers une diminution de la mobilité de la table et de la caisse liée très probablement à l'augmentation du nombre et à la tension des cordes.

L'ingénierie mécanique a notablement évolué depuis cinquante ans grâce aux modèles numériques qui mettent en évidence les effets de modifications structurelles et évitent la construction de prototypes longs et coûteux à réaliser. La lutherie est en passe aujourd'hui d'utiliser ces outils pour guider ses évolutions.

FAIRE « CHANTER LES ÉQUATIONS »

Les artisans disposeront ainsi de prototypes virtuels dont la conception est assistée par ordinateur. Toutefois, la connaissance des caractéristiques mécaniques d'un instrument, qui sont les données qu'utilise ce type de modèle, n'est pas toujours aisée. En effet, les paramètres mécaniques du bois varient souvent selon les échantillons et dépendent en outre des conditions hygrométriques et thermiques. Les caractéristiques des liaisons mécaniques, tels les collages, ainsi que les précontraintes introduites dans l'instrument lors de la fabrication sont également difficiles à quantifier. Néanmoins, les informations fournies par ces modèles sont riches et révèlent des quantités physiques difficilement mesurables, comme les transferts ou les couplages entre certaines parties du système.

Le prix à payer pour faire « chanter les équations » est le temps de calcul.

Les caractéristiques vibratoires et acoustiques d'un instrument sont utiles pour l'analyse de son fonctionnement. Ces caractéristiques sont accessibles *via* nombre d'outils, mais il s'agit le plus souvent d'instruments de laboratoire difficiles à mettre en œuvre chez les artisans luthiers.

Aujourd'hui, des outils métrologiques dédiés, à coût réduit, portables et robustes, associés à des interfaces en ligne permettant le calcul de paramètres acoustiques sont conçus pour répondre aux besoins de la profession. Cette démarche, nommée Pafi (Plateforme d'aide à la facture instrumentale) est développée au Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine (Laum) depuis plusieurs années, en particulier grâce à des projets d'élèves de l'École nationale d'ingénieurs de l'université du Maine (Ensim) en lien avec le pôle d'innovation de l'Institut technologique européen des métiers de la musique (Itemm) et les activités de l'Union nationale de la facture instrumentale (Unfi). Pour le luthier, plusieurs applications sont visées.

D'abord, l'établissement d'une sorte de carte d'identité technique, qui facilite la traçabilité des interventions tout au long de la vie de l'instrument. En cas de restauration ou de réparation, les comportements d'origine peuvent ainsi être retrouvés et l'on mesure la qualité d'une intervention, par exemple le revernissage. Ensuite, l'artisan s'assure de la reproductibilité d'un procédé de fabrication en archivant des fréquences modales à différents stades. Les outils métrologiques aident également au choix du matériau. Enfin, on peut confectionner des copies d'un instrument de référence, non pas uniquement en copiant sa géométrie, ses matériaux et son aspect, mais en reproduisant ses modes de vibration.

Comparer deux instruments peut alors s'effectuer au moyen d'une écoute des sons de synthèse dite hybride utilisant, d'une part, les modes mesurés d'un instrument et, d'autre part, un geste et des cordes connues numériquement.

Si Gaston Lagaffe avait eu vent de ces outils, son gaffophone n'aurait sans doute pas entraîné autant de dommages ! ■

Selon les fréquences, les vibrations d'une harpe (en rouge, vue de profil en haut et, en vert, vue de dessus en bas) se diffusent différemment dans l'air.

Les auteurs remercient Vincent Doutant et Jakez François qui sont à l'origine de ces travaux sur la harpe de concert.

BIBLIOGRAPHIE

J.-L. LE CARROU ET AL., 18th and 19th French harp classification using vibration analysis, *Journal of Cultural Heritage, Wooden Musical Instruments Special Issue*, vol. 27S, pp. S112-S119, 2017.

D. CHADEFaux, *Interaction musicien/instrument : cas de la harpe de concert*, Thèse de l'université Pierre-et-Marie-Curie, 2012.

J.-L. LE CARROU ET AL., Some characteristics of the concert harp's acoustic radiation. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 127(5), pp. 3203-3211, 2010.

C. WALTHAM ET AL., Vibrational characteristics of harp soundboards, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 124 (3), pp. 1774-1780, 2008.