

- > importants des masses d'air situées au voisinage des événements ; on parle de pistons d'air.

Ces deux modes sont aisément identifiables sur une guitare : en bouchant l'événement avec un bloc de mousse, le mode A_0 disparaît ; en ajoutant un poids sur la table, la fréquence du mode T_1 est décalée vers les graves.

Le mode A_0 amplifie les basses fréquences, car il donne lieu à une résonance qui relève les niveaux acoustiques autour de sa fréquence. Cet effet, nommé bass-reflex, est utilisé dans certaines enceintes acoustiques. Son rôle est important dans le cas de la guitare classique, où les modes A_0 et T_1 ont des fréquences voisines respectivement de 100 et 200 hertz. Petite, la table d'harmonie de la guitare rayonne mal, c'est-à-dire de façon inefficace, les fréquences inférieures à environ 100 hertz, à cause du phénomène de court-circuit acoustique. Aussi, accorder A_0 à cette fréquence renforce le rayonnement de la guitare dans une plage de fréquences où la table seule fonctionne mal.

Si la résonance du mode A_0 est une caractéristique acoustique importante pour une guitare, qu'en est-il pour une harpe ? Des expériences lors desquelles on a bouché tous les événements et ajouté des masses sur la table d'harmonie d'une harpe ont permis d'identifier A_0 et T_1 à des fréquences d'environ 170 et 150 hertz. Comment cela se traduit-il ? L'effet bass-reflex est moins marqué que dans le cas de la guitare, car les phénomènes d'amortissement sont plus importants et la présence d'autres modes que A_0 et T_1 rend la réaction de la table plus complexe et masque l'effet. Et surtout, la fréquence de A_0 est trop élevée ! Dans la harpe, le rôle attendu de l'effet bass-reflex serait de compléter le rayonnement en basses fréquences de la table, là où le court-circuit acoustique est important. Pour cela, la fréquence de A_0 devrait être faible, et au moins inférieure à celle de T_1 . Cette condition n'est pas remplie : la harpe n'utilise donc pas l'effet amplificateur que l'on pourrait attendre de A_0 .

De fait, dans une harpe, les événements sont d'abord conçus pour faciliter... un accès aux cordes ! En outre, le voisinage des événements est modifié par la présence du corps de l'instrumentiste. Dans une harpe, l'effet bass-reflex n'est donc pas encore optimisé, ou plutôt le processus, opéré par l'histoire de la musique, est ici inachevé. Cela peut s'expliquer par le nombre de harpes fabriquées, qui est bien moins important que le nombre de guitares, pour lesquelles le processus d'optimisation est plus abouti. La harpe est donc un instrument en évolution.

Comment les cordes et la table sont-elles couplées ? Une image peut aider à répondre. L'énergie qu'une corde transmet à la table est comparable à l'eau d'un seau que l'on vide dans une mare. Quand le seau est vidé rapidement, la mare est agitée, ce qui traduit un couplage

LE DOIGT ET LA CORDE

Pour émettre un son, le musicien pince la corde de l'instrument. Cette opération, extrêmement répétable et caractéristique de chaque instrumentiste, est l'objet de recherche au sein de l'équipe Lutheries-Acoustique-Musique de l'institut Jean-Le-Rond-d'Alembert de Sorbonne Université. Dans cette première étape, l'interaction du doigt et de la corde joue un rôle essentiel, car l'instrumentiste contrôle de nombreux paramètres rendant l'excitation dépendante de sa morphologie. Pour la harpe de concert, le pincement de la corde s'effectue par la pulpe du doigt et peut se décomposer en deux étapes avant le lâcher. D'abord, le musicien tire la corde jusqu'à

exercer une tension maximale, puis laisse glisser la corde sur sa première phalange. Cette façon d'attaquer la corde est caractéristique du son de chaque harpiste, ce qui rend possible l'identification de l'instrumentiste dès les premières notes jouées. Pour approfondir notre connaissance sur ce pincement et en caractériser les paramètres physiques discriminants, nous avons mis au point un modèle de cette interaction tenant compte du comportement viscoélastique du doigt, du frottement (similaire à celui d'un archet sur une corde de violon) ainsi que des paramètres de contrôle de l'instrumentiste. Le geste instrumental étant bref, nous avons obtenu les paramètres d'un

fort : la vibration et donc le son produit sont de grandes amplitudes, mais plutôt brefs. À l'inverse, quand le seau est vidé lentement, le couplage est faible : le son créé est modéré, mais dure longtemps.

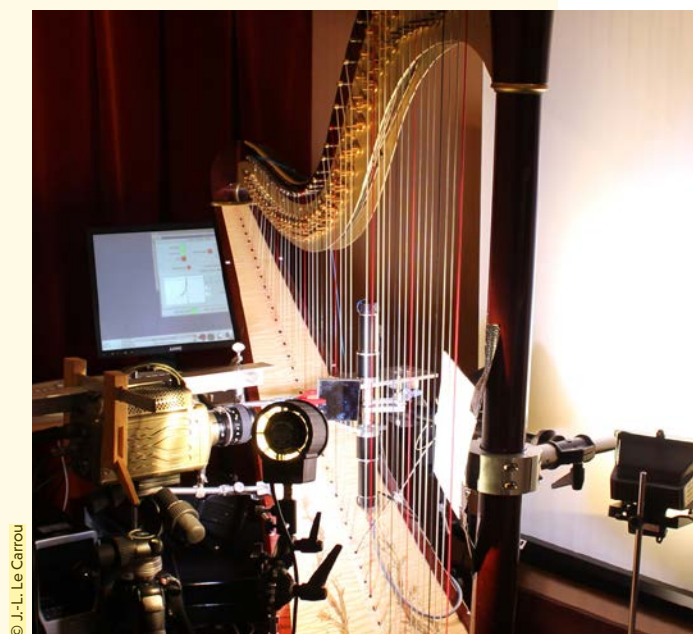
Dans une harpe, ce degré de couplage est mesuré par l'admittance. Il s'agit du rapport, dans le domaine des fréquences, entre la vitesse vibratoire en un point (celle de son déplacement périodique selon un axe perpendiculaire au plan de la table) et la force appliquée pour entraîner cette vitesse. Ce paramètre dépend de la fréquence de la corde et de sa position sur l'axe où sont fixées les cordes : on peut donc représenter l'admittance sous forme d'un plan position/fréquence où les cordes sont notées par des points. Pour ces derniers, l'abscisse est la position du point d'attache et l'ordonnée, la fréquence fondamentale de la corde. L'ensemble de ces points constitue une trajectoire (*voir la figure page ci-contre*).

LA CARTE D'ADMITTANCE

Quelles informations en tire le luthier ? Les variations de l'admittance le long de cette trajectoire constituent un indicateur de l'homogénéité de l'instrument. Lorsque le long de la trajectoire l'admittance varie trop ou de façon chaotique, les conditions de couplage entre les cordes et la table sont alors très fluctuantes d'une corde à l'autre : certaines cordes sonnent trop, et d'autres trop peu. L'artisan en déduit alors les différences d'amplitude et de décroissance entre les cordes. Grâce à ces

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

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.

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.

