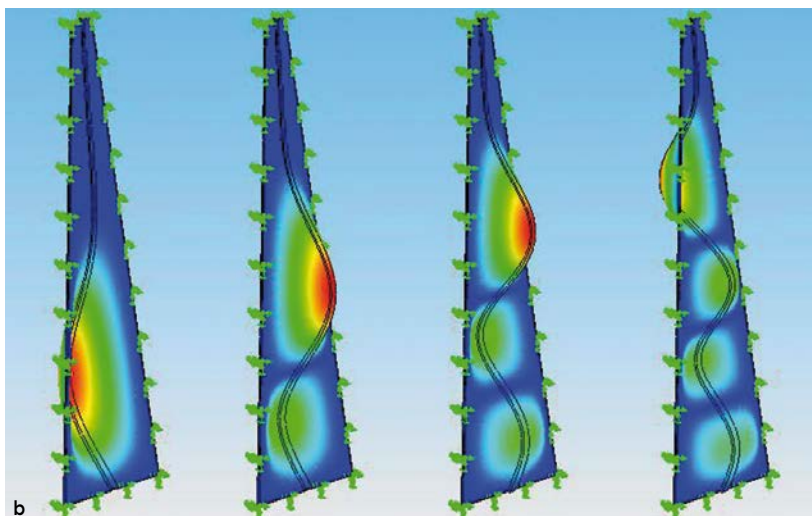
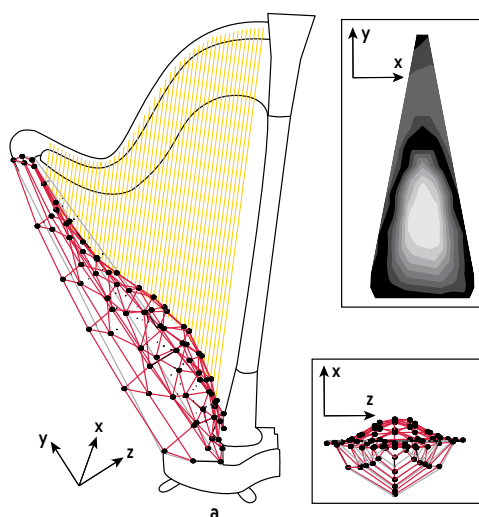




L'analyse modale d'une harpe consiste à déterminer ses modes de vibration, c'est-à-dire les fréquences et les champs vibratoires associés. On identifie ainsi le champ vibratoire de l'instrument soit expérimentalement, comme ici pour le premier mode d'air, nommé mode de Helmholtz et noté A_0 (a), soit numériquement pour les premiers modes de la table d'harmonie (b).

recouverte d'un plaquage dont la composition exacte est à la discrétion du luthier.

Cette plaque, trapézoïdale, est renforcée par plusieurs raidisseurs et par une barre centrale métallique. L'arrière de la table est raccordé à une caisse de résonance tronconique, tandis qu'une colonne soutient la console à l'avant. La difficulté d'accorder l'instrument est connue, tant les tensions des cordes rendent l'équilibre mécanique précaire. Un jeu de sept pédales reliées à un système de tiges articulant près de 1 500 pièces mécaniques différentes permet de modifier la longueur vibrante de chaque corde, et donc sa fréquence fondamentale.

COUPLAGES SYMPATHIQUES

Autre particularité de l'instrument, les nombreuses cordes créent des résonances par sympathie : la vibration d'une corde donnée entraîne, essentiellement par couplage solide, c'est-à-dire *via* les points d'insertion des cordes et l'ensemble de l'instrument, la vibration de ses voisines selon des amplitudes variables. En effet, le couplage entre des cordes est d'autant plus grand qu'il existe des relations simples entre les fréquences mises en jeu : une corde excite facilement les cordes situées à l'octave (le rapport des fréquences de vibrations est égal à 2) ou à la quinte de l'octave supérieure (le rapport est de 3). Ces couplages sympathiques engendrent un phénomène de halo sonore, qui est une signature acoustique de l'instrument. Trop important, ce halo est gênant et peut rendre l'instrument injouable. Le luthier doit donc le maintenir dans une limite raisonnable.

Du fait de ces couplages sympathiques, parmi d'autres, les sons produits ont un grand nombre de composantes spectrales, dont les fréquences sont parfois proches. Un autre type de couplage est dû à l'existence de deux

polarisations pour les cordes, correspondant à deux mouvements vibratoires, l'un dans le plan des cordes de la harpe et l'autre dans un plan perpendiculaire passant par la corde jouée.

Ces différents couplages donnent lieu à des phénomènes de battements et de décroissances multiples. De quoi s'agit-il ? Les battements sont des fluctuations lentes de l'amplitude du son dues à des interférences destructives et constructives entre des composantes spectrales de fréquences proches. Le phénomène de décroissance multiple apparaît quand plusieurs composantes du son sont amorties différemment : certaines sont dominantes au début du son, mais s'éteignent plus rapidement que d'autres, qui perdurent et sont dominantes à la fin du son (le son est alors dit rémanent). Voyons maintenant le mouvement vibratoire de la table d'harmonie, élément essentiel du rayonnement acoustique. L'analyse de la harpe a montré que, pour les premiers modes, ceux dont les fréquences propres sont les plus basses, le volume occupé par la caisse de résonance reste constant au cours de la vibration. Ces modes, sans grande importance acoustique, correspondent à des mouvements vibratoires de la caisse autour de ses points de fixation.

LES MODES DE L'INSTRUMENT

En revanche, les modes de fréquences plus élevées entraînent un mouvement de flexion important de la table d'harmonie et modifient le volume interne de la cavité ; ils engendrent un rayonnement acoustique notable. C'est le cas de deux modes nommés T_1 (le premier mode de la table, ou mode de table) et A_0 (le premier mode de l'air, aussi nommé mode d'air ou mode de Helmholtz). Les modes de table mettent en jeu principalement des vibrations de la table d'harmonie, tandis que les modes d'air correspondent à des mouvements

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