

**LA RÉALITÉ
VIRTUELLE
EST UN OUTIL
ESSENTIEL
À LA RECHERCHE
SUR LA PERCEPTION,
EN PARTICULIER
AUDITIVE**

des réflexions et absorptions subies par les ondes sonores. On constitue ainsi une bibliothèque de réponses de salles typiques. À l'instar de la technique binaurale, cette méthode garantit l'authenticité auditive de la simulation, mais elle souffre du caractère figé de la situation enregistrée. En particulier, elle interdit toute interactivité puisque la réponse est établie pour une position et une orientation données de la source et du récepteur, dans un lieu donné.

L'approche physique repose sur la simulation du comportement acoustique des parois du lieu virtuel. Les méthodes les plus courantes se fondent sur le modèle des « rayons sonores » qui se propagent en ligne droite dans l'espace. Les algorithmes construisent de façon itérative l'ensemble des chemins le long desquels le son se propage, en s'appuyant sur des modèles de diffusion atmosphérique, de réflectance des surfaces, de diffraction des arêtes... Les propriétés géométriques de l'ensemble des chemins permettent la construction d'un filtre encodant toutes les propriétés de la salle. Ces approches font l'objet de nombreuses recherches, notamment pour accélérer les calculs en vue d'une utilisation en temps réel.

LA RÉALITÉ SONORE AUGMENTÉE

Enfin, pour les situations de réalité virtuelle ne nécessitant pas un trop fort degré de cohérence entre le rendu sonore et visuel, on peut recourir à un modèle perceptif de l'effet de la salle, contrôlable par un ensemble de paramètres pertinents pour la perception, par exemple l'effet Doppler pour les sources en mouvement. Sans passer par une description exhaustive des propriétés du lieu, ce modèle permet notamment de déduire la durée de réverbération en fonction de données architecturales globales telles que le volume, et le rapport entre le niveau du son direct et le niveau de réverbération selon la distance entre la source et le récepteur.

La prise en compte de ces propriétés perceptives aide aussi à optimiser les algorithmes de simulation physique, ce qui est indispensable en cas de multiplicité des sources, faute de quoi les capacités de calcul des processeurs sont très vite dépassées. L'équipe de recherche REVES de l'Inria, par analogie avec des techniques de rendu graphique, exploite les propriétés de masquage auditif pour simplifier le traitement de la spatialisation sans dégradation du réalisme.

L'intérêt grandissant pour les environnements immersifs et interactifs, y compris dans le domaine artistique, incite à replacer les questions de spatialisation du son dans le cadre plus large de l'interaction entre les sens visuel, auditif et proprioceptif. À ce titre, la reproduction holo-phonique et la reproduction binaurale couplées à un dispositif de suivi du mouvement sont privilégiées, car elles assurent la correspondance en continu entre les indices auditifs spatiaux et les mouvements d'un utilisateur.

Par exemple, depuis 2013, en partenariat avec France Télévisions, Radio France, Orange..., nous développons le projet BiLi (*Binaural Listening*) qui consiste à déployer des solutions d'écoute binaurale individualisée pour le grand public. L'idée est d'améliorer l'expérience personnelle sur les appareils personnels (tablette, smartphones...) qui constituent aujourd'hui l'essentiel des moyens d'écoute. Quatre défis ont dû être relevés : définir une méthodologie pour évaluer la qualité d'expérience des auditeurs ; acquérir les filtres HRTF d'un individu ; concevoir un standard correspondant à ces données HRTF individuelles ; enfin, élaborer des processeurs d'écoute binaurale en temps réel et multiplateforme.

Les diverses technologies de spatialisation sonore que nous venons d'exposer témoignent de la vitalité des recherches dans ce domaine. Par ailleurs, il est intéressant de constater que les modèles ne précèdent pas toujours les technologies : si le formalisme décrivant la reproduction du champ acoustique précède de plus d'un siècle les premiers essais des systèmes WFS, *a contrario*, les premières réalisations de la stéréophonie précèdent les travaux qui en décrivent les fondements perceptifs. Le « théâtrophone » (voir la figure page ci-contre) de l'inventeur Clément Ader, qui permettait à Marcel Proust d'écouter par téléphone et en stéréo des retransmissions de théâtres parisiens, précède ainsi de vingt ans les travaux de Lord Rayleigh sur la localisation auditive !

De nos jours, la réalité virtuelle est à la fois un miroir de nos propres connaissances – on y expérimente le savoir qu'on y a injecté –, mais aussi un terrain d'approfondissement des connaissances, car elle permet de manipuler nos sens. Au-delà des applications artistiques, ludiques ou industrielles, la réalité virtuelle est un outil essentiel à la recherche sur la perception, en particulier auditive. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. HENDRICKX ET AL., Improvement of externalization by listener and source movement using a « binauralized » microphone array, *JAES*, vol. 65, pp. 589-599, 2017.

A. ANDREOPOULOU ET B. KATZ, Identification of perceptually relevant methods of inter-aural time difference estimation, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 141, 3635, 2017.

N. TSINGOS ET O. WARUSFEL, Modèles pour le rendu sonore. Dispositifs et interfaces de restitution sonore spatiale, in *Traité de la réalité virtuelle*, P. Fuchs et G. Moreau, Les presses de l'École des Mines de Paris, 2005.

L'ESSENTIEL

- La harpe est un instrument complexe : le nombre de cordes important et les tensions qu'elles exercent influent sur le son de l'instrument. De plus, la vibration d'une corde entraîne celle de ses voisins.
- Ces divers phénomènes vibratoires sont étudiés par les physiciens qui en identifient les caractéristiques principales.
- Ils peuvent alors mettre au point des outils d'aide à la facture instrumentale, par exemple la carte d'admittance qui révèle le couplage entre les cordes et la table d'harmonie où elles sont fixées.
- Ils analysent également les interactions des doigts et des cordes, caractéristiques de chaque instrumentiste.

LES AUTEURS



FRANÇOIS GAUTIER
professeur au Laum (CNRS) et à l'École nationale supérieure d'ingénieurs du Mans.



JEAN-LOÏC LE CARROU
Maître de conférences à l'institut Jean-Le-Rond-d'Alembert (CNRS) de Sorbonne Université.

Dans les cordes d'une harpe

Selon un proverbe irlandais du XII^e siècle, tout gentilhomme devait avoir un coussin sur sa chaise, une femme vertueuse et une harpe bien accordée. Les physiciens peuvent aider... pour l'instrument.

L

e 9 mars 1967, un étrange instrument de « musique » est inventé... par Gaston Lagaffe dans le journal *Spirou*. Ce gaffophone tient plus de l'engin de démolition par les nombreux dégâts que ses vibrations ont entraînés que de la harpe dont il est pourtant une sorte d'avatar. Quelques amateurs se sont

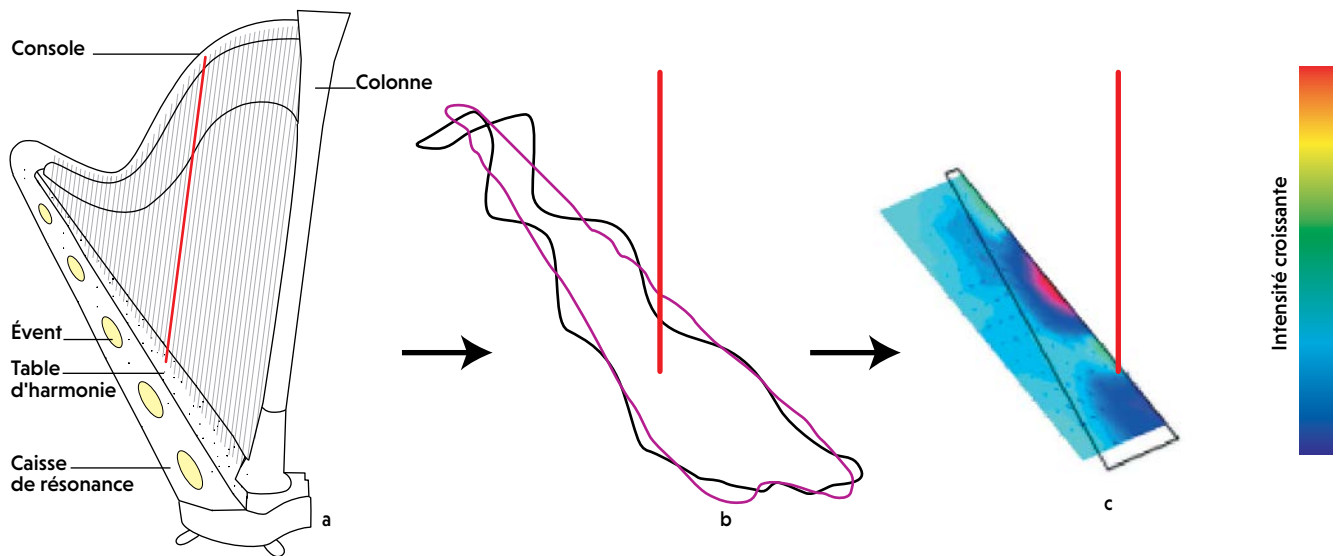
risqués à construire de vrais gaffophones, mais aucun n'a intégré d'orchestre symphonique, les harpistes préférant sans doute des instruments dont la qualité a fait ses preuves, notamment ceux de facteurs renommés.

DES GAFFOPHONES DE QUALITÉ

Ces instruments haut de gamme sont le plus souvent fabriqués de façon artisanale. Mais comment définit-on la qualité d'un instrument ? Il s'agit d'une notion globale qui recouvre le rendu sonore, l'expressivité ou la facilité de jeu, et associe des critères d'ergonomie, de solidité, de tenue dans le temps, notamment en ce qui concerne l'accord de l'instrument. Certains de ces attributs sont objectifs, d'autres reposent sur la perception subjective de l'instrument par l'auditeur. Pourtant, les implications économiques font de la qualité un enjeu majeur, car elle justifie souvent des différences de prix notables.

Les instruments de musique résultent d'un processus d'optimisation, par approximations ➤





➤ successives, sur lequel les contraintes économiques pèsent en permanence. Par exemple, aujourd'hui, les accords internationaux de protection de la faune et de la flore limitent entre autres les prélèvements de pernambouc (un bois brésilien) pour les archets ou de palissandre pour les guitares et les percussions. Pour contourner ces obstacles, les constructeurs ont besoin de matériaux alternatifs et d'innovations qui ne peuvent venir que d'outils scientifiques. Ils sont aussi nécessaires pour améliorer la compétitivité des entreprises artisanales. Cela place l'étude de la physique des instruments de musique au cœur d'un processus conduisant à une facture performante.

UN MODÈLE À CORDES

Les instruments à cordes sont classés selon la façon dont le son est produit : on distingue ainsi les instruments pour lesquels des sollicitations sont entretenues (la corde frottée du violon) et ceux à cordes libres qui peuvent être frappées (le piano) ou pincées (la harpe ou la guitare). Dans ce dernier cas, les oscillations résultent d'une perturbation de l'état initial et constituent un phénomène quasi périodique, s'amortissant avec le temps. Rappelons que les vibrations d'une corde sont la superposition de contributions élémentaires, nommées modes, dont les fréquences sont des multiples entiers d'une fréquence dite fondamentale. Chaque mode de vibration est doté de caractéristiques, tels sa fréquence propre et son coefficient d'amortissement qui traduit la rapidité avec laquelle la corde retrouve son état initial (avant pincement).

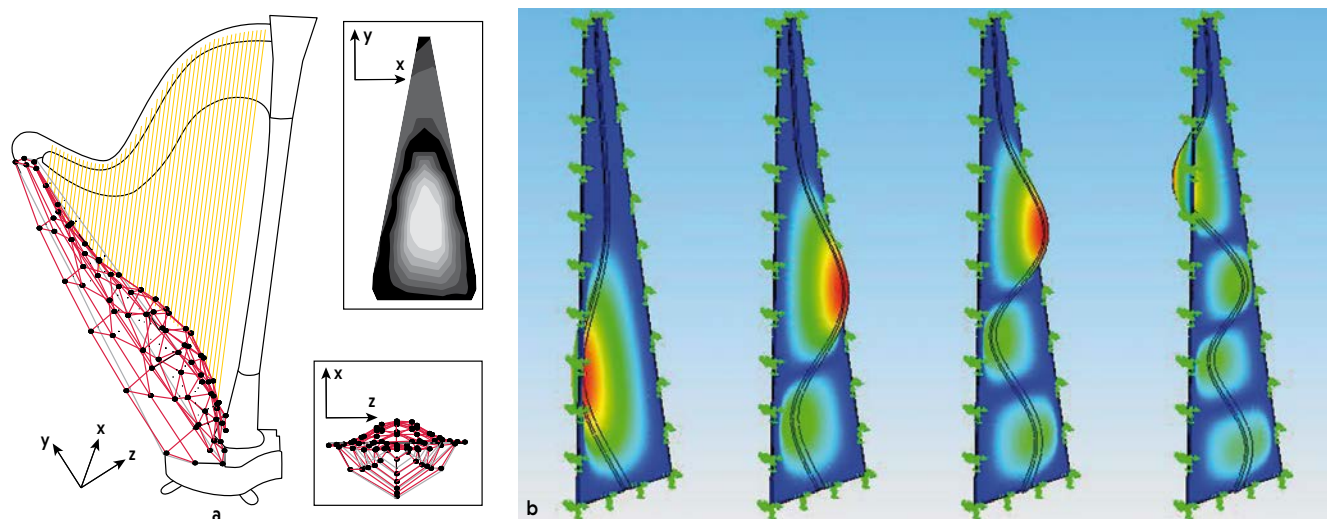
Le rôle du luthier est de concevoir un dispositif mécanique robuste qui transforme en son la vibration de la corde. En effet, la corde est, seule, quasi incapable de mettre en

mouvement l'air, et ainsi de créer un son audible. Elle est donc associée à un système vibrant plan, une plaque nommée table d'harmonie (voir la figure ci-dessus). Cet élément a un rôle essentiel, celui du rayonnement acoustique, mécanisme par lequel la structure vibrante (principalement la table) transmet son mouvement à l'air environnant, mouvement ensuite propagé de proche en proche jusqu'à nos oreilles.

Cependant, pour une plaque seule, les rayonnements des deux faces créent des contributions presque opposées qui ont tendance à s'annuler. L'introduction d'une cavité diminue ce phénomène de court-circuit acoustique en réduisant le rayonnement de la face arrière de la plaque. Enfin, l'aménagement de trous dans cette cavité, des ouïes ou des événements, produit une résonance des basses fréquences qui augmente l'importance du champ rayonné dans ce registre de fréquences. La plupart des instruments à cordes sont construits sur ce modèle, dont nombre de paramètres sont ajustables par le luthier. Le choix de l'artisan est un équilibre entre son intuition et des règles issues de l'analyse du fonctionnement acoustique des instruments.

Examinons maintenant une harpe. Connue depuis l'Antiquité sous sa forme actuelle (elle est représentée sur un sceau sumérien), elle a néanmoins beaucoup évolué et donné lieu à de multiples modèles sur les différents continents selon la forme, la taille et le nombre de cordes. La grande harpe, ou harpe de concert, utilisée dans l'orchestre symphonique, est constituée de 47 cordes, fixées entre la console, en haut, et la table d'harmonie, en bas. Cette dernière est constituée d'une plaque faite généralement de bois d'épicéa, plus rarement en carbone,

La production d'un son avec une harpe se déroule selon plusieurs étapes : le doigt excite la corde (a, en rouge) qui communique son mouvement à la table d'harmonie (b, en noir) et crée un rayonnement sonore, visible sur la carte d'intensité acoustique (c).



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'évent 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.

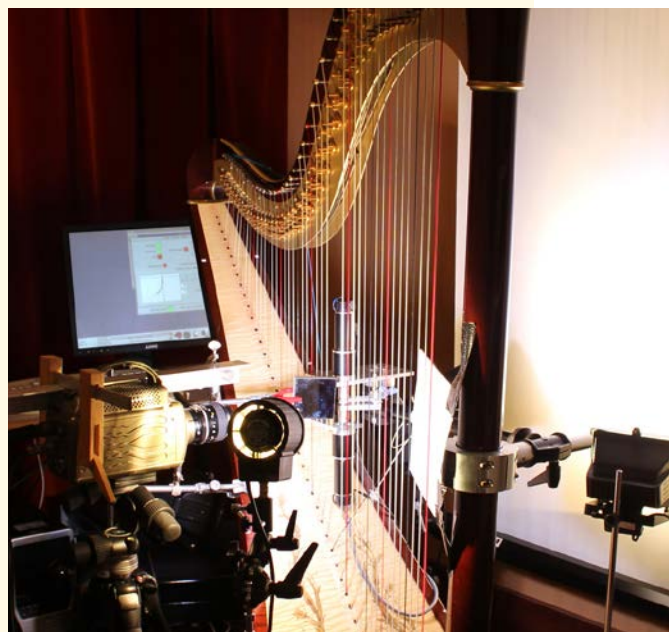
Dans une harpe, ce degré de couplage est mesuré par l'admittance. Il s'agit du rapport, dans le domaine des fréquences, entre la vitesse vibratoire en un point (celle de son déplacement périodique selon un axe perpendiculaire au plan de la table) et la force appliquée pour entraîner cette vitesse. Ce 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.

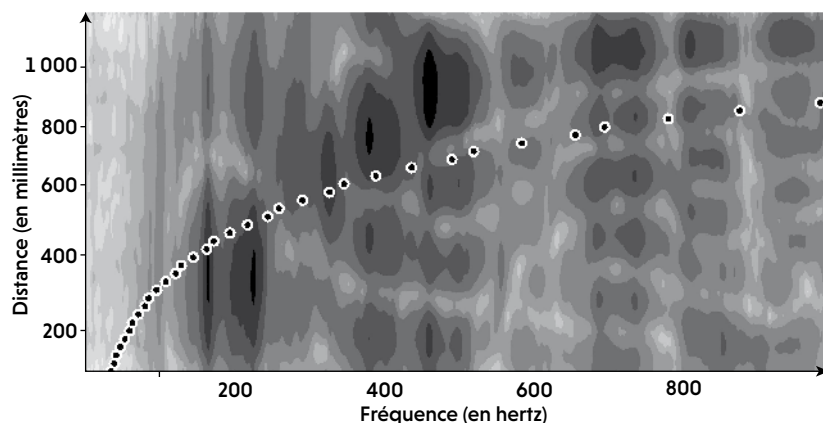
Le luthier influe sur la carte d'admittance, sans le savoir, en modifiant la géométrie de la table et par le choix des matériaux. La trajectoire est quant à elle fixée par les fréquences de jeu et les positions des points d'accrochage.

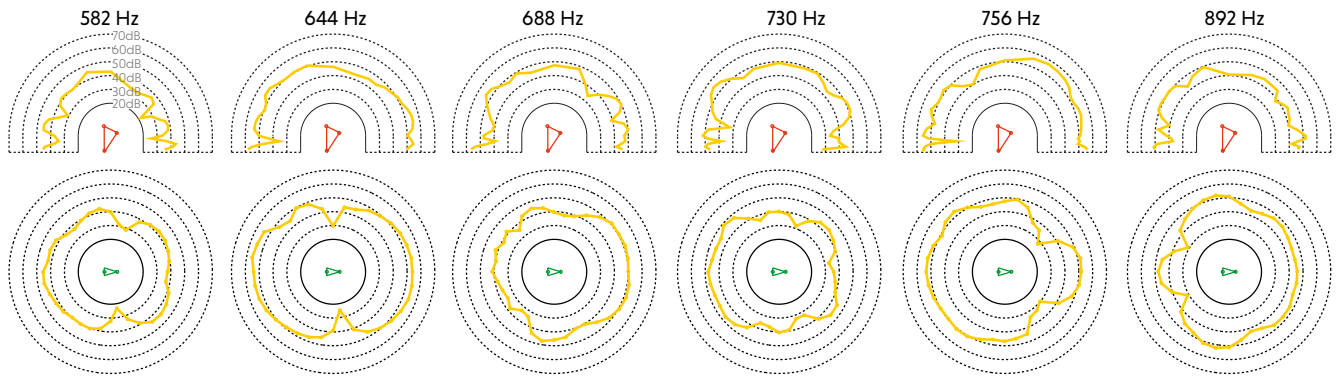
Le physicien Chris Waltham, de l'université de Vancouver, au Canada, a développé une interprétation physique de cette carte d'admittance. La table d'harmonie est moins épaisse près de la console qu'à proximité du pied de la

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.





➤ 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.

**OFFRE
1 AN**

2 FORMULES AU CHOIX

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr

PAG18STDDOS



OUI, je m'abonne
pour 1 an à POUR LA **SCIENCE**

☐ M. ☐ Mme

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal Ville:

Téléphone | | | | | | | | | |

Email: (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

☐ **Par chèque à l'ordre de Pour la Science**☐ Carte bancaire

Numéro

--	--	--	--

--	--	--	--

--	--	--	--

--	--	--	--

Date d'expiration Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire:

Groupe Pour la Science – Siège social: 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32 000 € – RCS Paris B 311 797 393 - Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

1 / JE CHOISIS MA FORMULE (merci de cocher)



FORMULE INTÉGRALE

- 12 n^{os} du magazine papier
- 4 Hors-Séries papier
- Accès illimité aux contenus en ligne

99 €
Au lieu de ~~174,40 €~~

11A99E



FORMULE
PAPIER
+ HORS-SÉRIE

- 12 n^{os} du magazine papier
- 4 *Hors-Séries* papier

79 €
Au lieu de
~~114,40 €~~

A79E

* Par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2018 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter boutique.pourlascience.fr.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour générer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour La Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour La Science* ne transfère pas vos données personnelles à des tiers. Vos données personnelles (y compris vos données exclusivement destinées à *Pour La Science*). Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://brandify.fr/charte-donnees-pc> Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, de déplacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits, vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.



PLUS SIMPLE, PLUS RAPIDE
ABONNEZ-VOUS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

