

PHYSIQUE

■ **EN DEUX MOTS** ■ La qualité d'un instrument de musique comme une guitare n'est pas uniquement une question d'acoustique,

mais aussi de perception du son, tout autant que des conditions de sa fabrication et de la nature des différents bois utilisés. Les physi-

ciens tentent d'expliquer les propriétés des instruments en s'appuyant sur le savoir-faire des luthiers.

L'essence de la musicalité

Les caractéristiques musicales des instruments à cordes dépendent beaucoup des propriétés mécaniques des bois qui les composent. Cette découverte, modélisée récemment par des physiciens, pourrait donner naissance à de nouveaux instruments.

Cécile Michaut est journaliste scientifique.

Peut-on expliquer, avec la physique, ce qui fait la beauté des sons émis par un instrument de musique ? Cela semble impossible car la qualité sonore est autant une question de perception du son par l'auditeur que d'émission d'ondes sonores par l'instrument. Les physiciens sont-ils pour autant condamnés à se désintéresser de la musique ? Non, car ils peuvent d'abord tenter de comprendre comment les luthiers fabriquent leurs instruments et modéliser ainsi le résultat de leurs pratiques. Pour cela, les spécialistes de l'acoustique prennent en compte les aspects psychologiques et cognitifs de l'audition, le savoir-faire à l'origine de la fabrication des instruments, et même les compétences des musiciens professionnels.

Qualité sonore

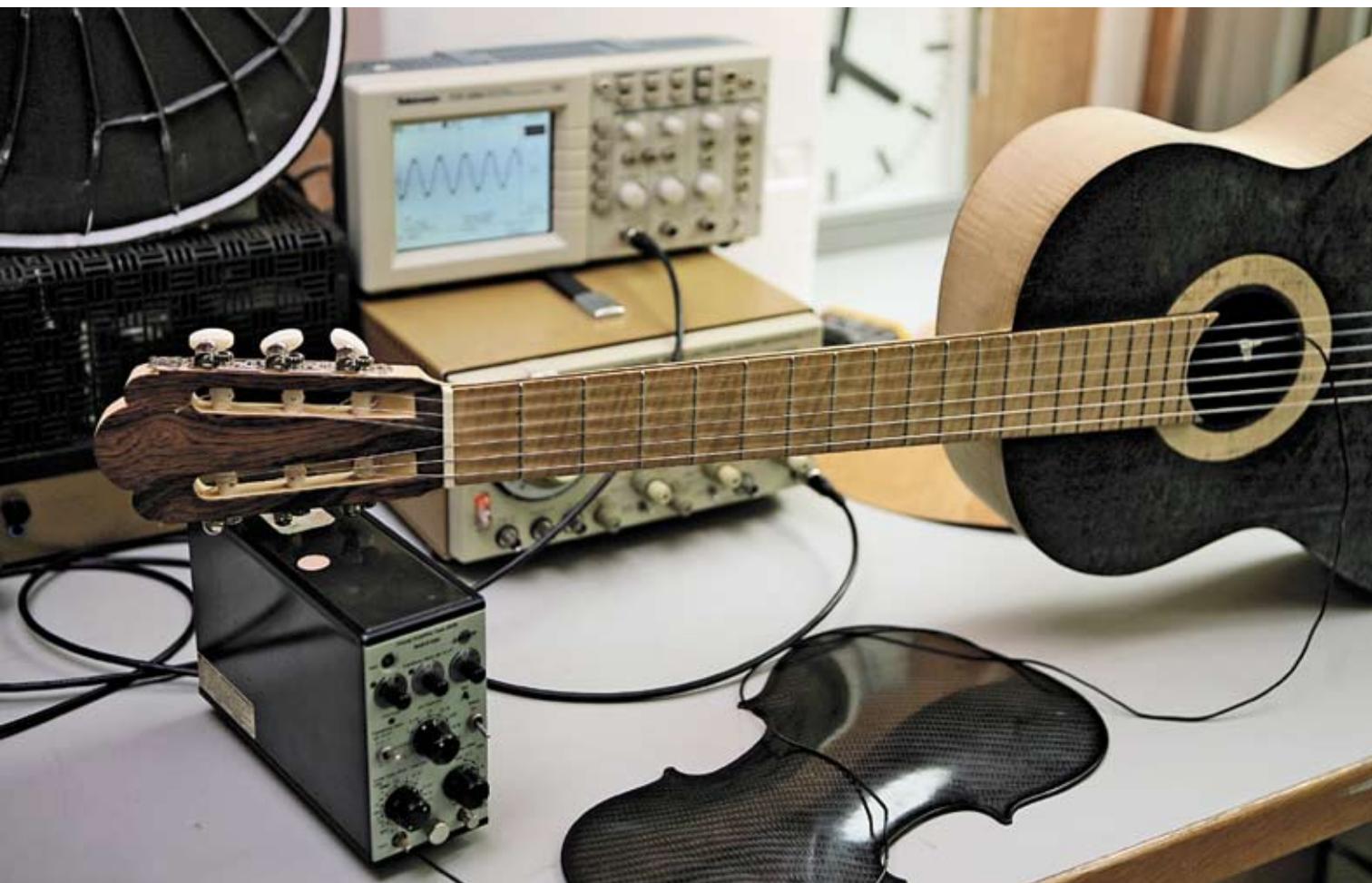
En règle générale, les modèles théoriques que les physiciens élaborent visent à rendre compte du comportement global d'un instrument de musique, ce qui donne des résultats assez probants. Mais, lorsqu'ils tentent de comprendre ce qui fait la « qualité sonore » des instruments, les scientifiques se trouvent confrontés à des éléments beaucoup trop subjectifs pour être intégrés à leurs modèles. C'est pourquoi les chercheurs

de l'équipe lutherie, acoustique et musique (LAM) de l'institut Jean-le-Rond-d'Alembert, à Paris, ont opté pour une démarche inverse : partir des savoir-faire des luthiers et tenter de comprendre, à l'aide des lois de la physique, comment ils ont fabriqué leurs instruments.

Parmi les questions posées : comment les luthiers choisissent-ils les essences de bois qui composent leurs instruments ? Pour y répondre, les membres du LAM



SELON LES ESSENCES, LE BOIS utilisé dans la fabrication des instruments présente des propriétés d'amortissement du son différentes.



DANS L'ATELIER DU LUTHIER cohabitent savoirs-faire centenaires et instruments de mesure contemporains. Un luthier passionné par l'aspect scientifique de son métier a consigné l'ensemble des opérations effectuées sur ses guitares, offrant aux chercheurs un précieux outil de classification.

ont demandé à Daniel Friedrich, artisan renommé et passionné par l'aspect scientifique de son métier, comment il procédait. Ce luthier a conservé des échantillons des bois utilisés pour chacun de ses instruments. Dans ses cahiers d'atelier, il a aussi consigné l'ensemble des opérations qu'il a effectuées sur ses guitares, et a décrit, avec son expertise et ses mots propres, les types de sons émis par chacune d'entre elles.

Les chercheurs du LAM se sont appuyés sur cette expertise pour mieux comprendre les relations entre les propriétés des différents bois et les caractéristiques sonores des instruments. En analysant les paramètres mécaniques – tels que la masse volumique, l'élasticité et l'amortissement – de divers bois de lutherie et en les comparant aux sonorités des guitares décrites par D. Friedrich, une doctorante du LAM, Dominique Douau, a pu classer les guitares dans un diagramme élaboré à partir de deux caractéristiques sonores : la puissance et la « clarté » du timbre. Même si les échantillons tendent

Pour fabriquer un matériau artificiel, il a fallu définir la puissance et le timbre visés

à se regrouper par espèces de bois sur le diagramme, on constate aussi qu'un échantillon d'épicéa peut se retrouver au milieu d'échantillons de cèdres rouges, et *vice versa*. En revanche, les bois dont la raideur, la densité et l'amortissement sont similaires se situent toujours dans les mêmes zones du diagramme. Les chercheurs du LAM ont ainsi émis l'hypothèse que, pour une forme de guitare identique, les instruments

présentant des caractéristiques sonores assez proches provenaient de bois aux propriétés mécaniques similaires.

Mais, pour prouver que cette corrélation établissait réellement

un lien entre les propriétés mécaniques des bois et le son des instruments, il fallait suivre le chemin inverse, c'est-à-dire définir quel timbre et quelle puissance on souhaitait atteindre. Il s'agissait donc de fabriquer un matériau artificiel dont les propriétés mécaniques permettraient d'obtenir les caractéristiques sonores visées. Ainsi, les chercheurs du LAM ont conçu des matériaux en fibres de carbone aux ⇒

PHYSIQUE

⇒ propriétés mécaniques similaires à celles spécifiées dans les diagrammes. Ils ont pu vérifier que les instruments construits avec ces matériaux sonnaient bien comme souhaité.

Restait encore à effectuer un test ultime: demander l'avis des guitaristes professionnels. Las! Tous les musiciens ont constaté qu'il était facile de jouer de ces instruments en fibre de carbone, produisant des sons puissants au timbre clair. Mais tous les guitaristes ont jugé ces sons... «ennuyeux»! «*Nous avons ainsi compris qu'il manquait quelque chose à notre modèle. Mais quoi donc?*» se souvient Charles Besnainou, chercheur au LAM. Car comment caractériser un son «ennuyeux»? L'aide de psychologues a été nécessaire pour «décrypter» le langage des musiciens.

Fibre de carbone

«*C'est toujours le même son, quoi que je fasse*», a affirmé un musicien. Cette affirmation a été contredite par l'analyse spectrale des sons émis par ces guitares en matériaux composites, qui se révèlent être très variés. «*J'ai l'impression que le son ne dure pas*», précisait, pour sa part, un autre guitariste. Mais, encore une fois, l'argument a été réfuté par les enregistrements montrant que les sons produits par les instruments en fibre de carbone duraient encore plus longtemps qu'avec les instruments en bois. «*Ce n'est pas... vivant*», a expliqué, un peu hésitant, un troisième. Et là, ce fut le dé clic: «*Nous avons compris que le problème provenait du fait que le son n'évoluait pas au cours du temps,*



LE SON PRODUIT sur une guitare en matériau composite dure plus longtemps que sur un instrument en bois. Pourtant les musiciens ressentent l'inverse, en raison de la linéarité du son, génératrice d'ennui.

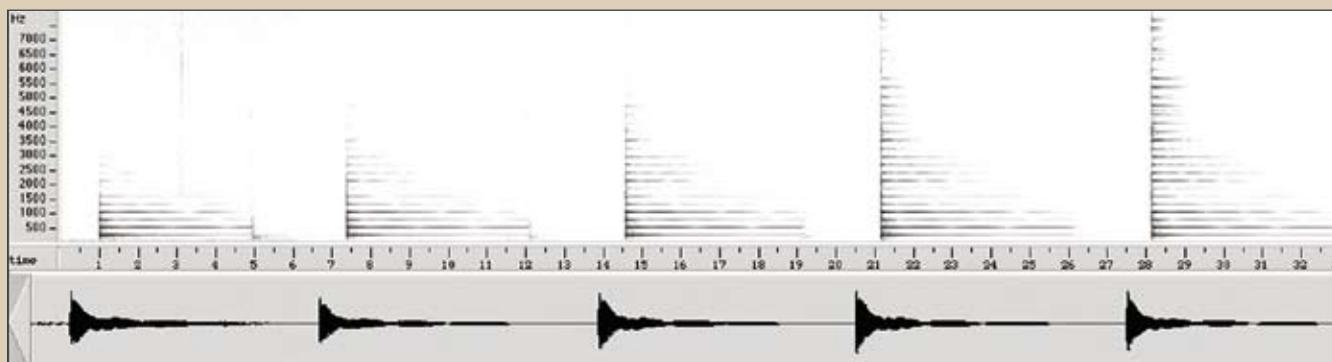
raconte C. Besnainou. Or, lorsque le son est parfaitement identique à ce qu'il était quelques instants auparavant, l'information est redondante, et notre cerveau s'en désintéresse assez vite. D'où le sentiment d'ennui

SPECTRE

L'architecture du son

■ **LORSQU'UN MUSICIEN FAIT DES NUANCES**, c'est-à-dire qu'il joue doucement (*piano*), comme ici à gauche, ou puissamment (*forte*), à droite, le son n'est pas simplement plus ou moins intense. Sa composition spectrale est aussi modifiée. Même en ramenant au même niveau sonore quatre nuances d'intensité, tous les auditeurs reconnaissent le *forte* du piano simplement parce que le spectre sonore du son *forte* est plus riche. C'est pourquoi le timbre d'un son non entretenu évolue au cours du temps: l'attaque du son (c'est-à-dire le début de l'émission sonore) est plus puissante et contient de nombreuses composantes qui ne se retrouvent pas à faible puissance. «*Les non-linéarités liées à la manière d'exciter les cordes (corde pincée, frappée ou frottée) sont déjà bien étudiées et caractérisent les*

familles d'instruments (les violons, les guitares, les pianos...), explique Charles Besnainou, du LAM. Il existe d'autres non-linéarités, liées aux propriétés mécaniques des matériaux avec lesquels on construit l'instrument, ou dues à l'architecture même de l'instrument. Nos mesures montrent que les instruments de grande qualité sont le siège de ces comportements non linéaires dans certaines bandes des fréquences, alors que les instruments médiocres n'en recèlent pas. De plus, dès lors que le luthier modifiait le réglage de l'âme du violon (un petit cylindre à l'intérieur de l'instrument, qui joue un rôle essentiel dans la transmission des vibrations) de manière à perdre les qualités d'excellence de l'instrument, nos mesures indiquaient une disparition de ces non-linéarités. »



qui s'en dégage. En revanche, lorsque le son évolue et qu'il est légèrement modulé, notre attention reste sollicitée durant une longue période.»

Un autre résultat obtenu par le LAM plaide en faveur de cette interprétation. Deux étudiants du laboratoire qui souhaitaient travailler sur les propriétés sonores des microphones de guitares électriques ont choisi, pour leurs tests, un certain type de micro, meilleur, de leur point de vue, pour ses qualités de « sustain » – un terme qui tente de décrire la tenue du son au cours du temps. « Pour moi, tous les micros se valaient, se souvient C. Besnainou. Mais nous avons découvert que ceux choisis par ces deux étudiants présentaient des propriétés que nous autres physiciens qualifions de “non linéaires”. » Cela signifie que le son émis par ces micros est différent à faible et à forte intensité. Ce comportement tire son origine dans des inhomogénéités dans le champ magnétique produit par les micros en question. Les propriétés de non-linéarité semblent donc primordiales pour que le son plaise aux musiciens.

Une couche élastique

Mais d'où proviennent ces non-linéarités dans les instruments en bois? Pour le savoir, considérons qu'un instrument de musique peut être modélisé comme un ensemble d'oscillateurs élémentaires. Autrement dit, l'instrument peut être « découpé » en une multitude de petits ensembles masse-ressort-amortisseur. L'amortissement du son par le bois semble susceptible de produire les non-linéarités. En effet, le bois a des propriétés d'amortissement mécanique que l'on n'a pas retrouvés dans le composite utilisé pour l'expérience. L'équipe du LAM a donc incorporé une couche de matériaux viscoélastiques (qui se déforme, et transmet donc les sollicitations mécaniques avec un léger retard) dans le matériau composite. Et, grâce à cet apport, les musiciens professionnels ont trouvé bien meilleur le son des instruments.

Ces recherches, mêlant physique et lutherie, permettent de mieux comprendre l'influence des bois dans les instruments à cordes. Elles mettent en évidence le rôle primordial de la viscoélasticité de ce matériau qui, jusqu'à présent, n'avait pas été prise en compte dans les modèles reproduisant le fonctionnement des instruments de musique. Pourrait-on se servir de ces avancées pour améliorer la qualité des instruments, voire en créer de nouveaux? « Nous pouvons tenter de modifier le son sur commande », imagine C. Besnainou. Pour cela, il faudrait modifier en temps réel les propriétés mécaniques de l'instrument qui influencent le son. Les technologies existent, et sont mises en pratique depuis peu au LAM. Il suffit d'installer des capteurs sur un instrument de musi-

Les technologies existent pour modifier le son d'un instrument en temps réel

que, ainsi que des actionneurs, et de les relier par un programme informatique qui contrôle l'ensemble: lorsque le son présente telle ou telle caractéristique, l'actionneur envoie telle ou telle force, qui transforme alors le comportement vibratoire de l'instrument, donc le son qu'il rayonne. On pénètre là dans le domaine des instruments dits « augmentés » par informatique. Reste à déterminer quelles gammes de fréquences il faut transformer pour rendre l'instrument non seulement plus riche, mais aussi plus harmonieux. ■■ C. M.

Photos : Bertrand Deprez/VU

MÉCANIQUE Des pianos sous contrainte

■ POUR LES PIANOS AUSSI, l'expérience des fabricants d'instruments est indispensable. Adrien Mamou-Mani, de l'institut Jean-le-Rond-d'Alembert, a soutenu sa thèse de doctorat en 2007 sur les tables d'harmonie des pianos [1]. Ce sont les minces planches de bois placées sous les cordes des pianos à queue, ou derrière les cordes des pianos droits, qui vibrent et amplifient le son. Les fabricants de piano affirmaient qu'il fallait « mettre en charge » cette table d'harmonie. Qu'est-ce que cela signifie? Après discussion avec plusieurs fabricants, A. Mamou-Mani a compris qu'il s'agissait de régler l'angle de contact entre les cordes et le chevalet de la table d'harmonie, que déforme la tension des cordes. Cette déformation, qui change les caractéristiques sonores du piano, n'avait pas été prise en compte dans les modèles habituels. « Nous avons fait des calculs simples à base d'oscillateurs (ensemble masse-ressort), qui montrent comment les vibrations du piano sont modifiées par les contraintes mécaniques imposées sur la table d'harmonie, décrit A. Mamou-Mani. Nous avons effectué des modélisations numériques plus complexes, plus représentatives d'un piano réel. Enfin, nous avons construit un prototype d'instrument sur lequel nous pouvions régler les déformations de la table d'harmonie jusqu'à certaines configurations extrêmes inspirées par nos modélisations. » Dans ce cas, on obtient des vibrations géantes de la table d'harmonie, qui engendrent des sons originaux.



[1] A. Mamou-Mani, J. Frelat, C. Besnainou, « Numerical Simulation of a Piano Soundboard Under Downbearing », à paraître dans le *Journal of the Acoustical Society of America* (disponible sur <http://adrienmamoumani.wordpress.com>)