

L'ESSENTIEL

● Les luthiers s'appuient sur un savoir-faire traditionnel pour évaluer le son des instruments qu'ils perçoivent et façonnent à l'oreille.

● Des systèmes de mesure des vibrations existent pour compléter ce savoir-faire, mais ils sont lourds et coûteux. Des chercheurs ont développé

une technique de visualisation rapide et fiable des modes de vibration: l'holographie compressée.

● Cette technique associe des outils récents de plusieurs disciplines: mathématiques, informatique, acoustique et traitement du signal.

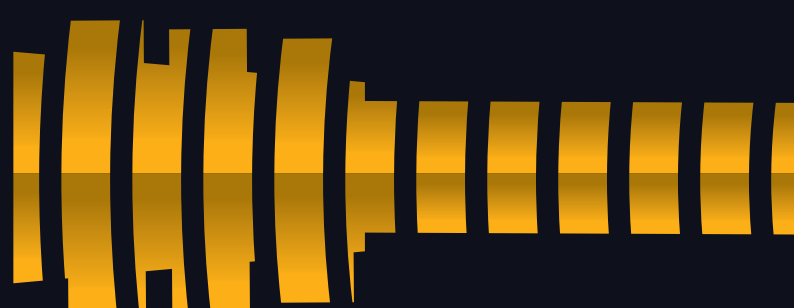
LES AUTEURS

NANCY BERTIN
chargée de recherche
CNRS à l'Irisa
de Rennes.

LAURENT DAUDET
professeur à l'institut
Langevin
de l'université
Paris-Diderot.

RÉMI GRIBONVAL
directeur de recherche
Inria à l'Irisa
de Rennes.

FRANÇOIS OLLIVIER
maître de conférences
à l'institut d'Alembert,
à l'université
Pierre-et-Marie-Curie,
à Paris.



L'holographie au secours des luthiers

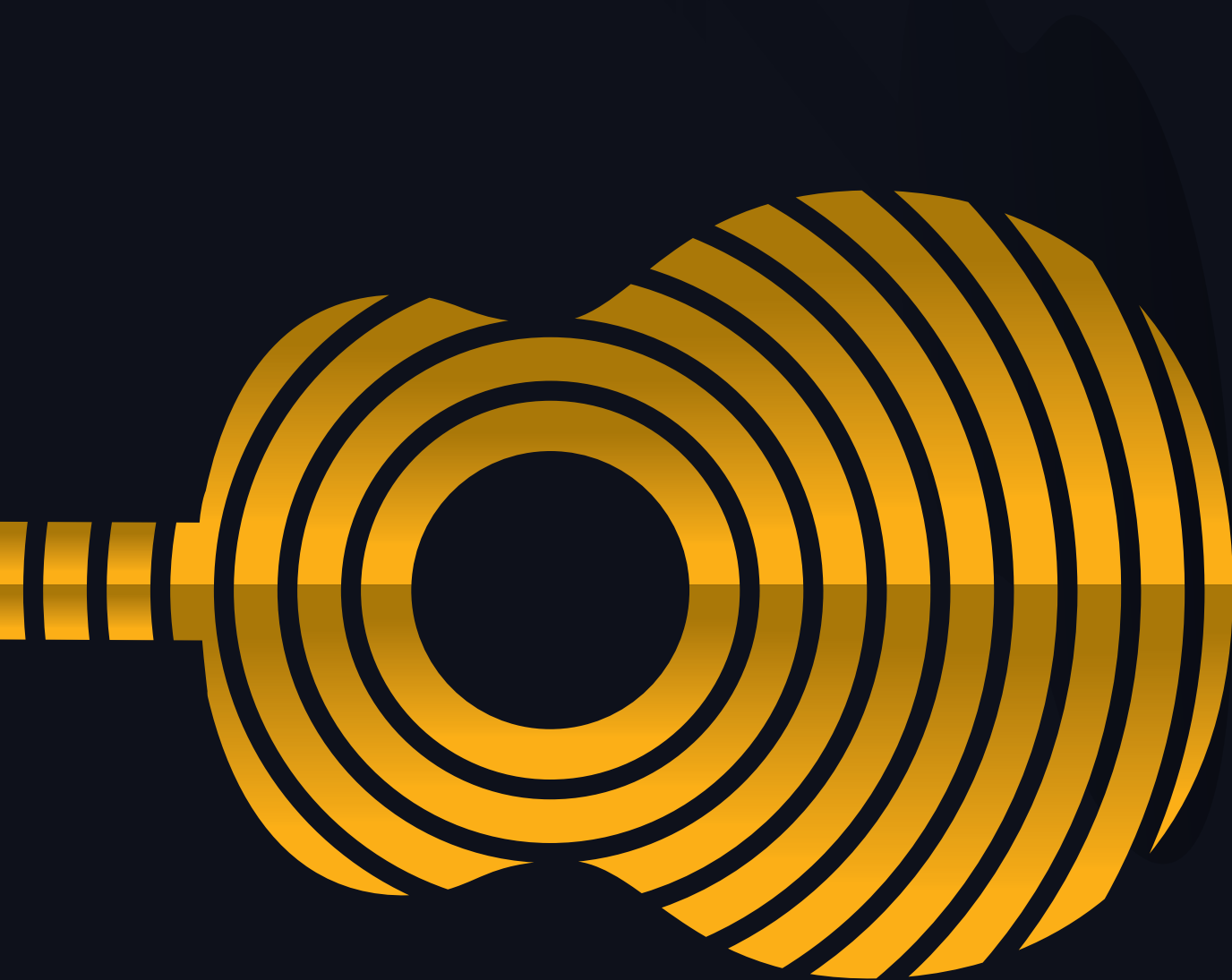
Lorsqu'il fabrique un instrument, le luthier le peaufine en écoutant les sons que ses vibrations produisent. Une nouvelle technique d'analyse et de visualisation des vibrations – l'holographie acoustique – lui faciliterait la tâche.

T

oc toc toc! Plutôt que de demander: «Qui est là?», vous feriez mieux de poser la question: «Qui fait vibrer la porte?» Car en effet, en frappant à la porte, on la fait vibrer. Le mouvement, imperceptible à l'œil nu, crée dans l'air environnant une alternance de surpressions et de dépressions locales qui se propagent à 340 mètres par seconde et atteignent nos oreilles. La vibration engendre ainsi une

onde sonore, c'est-à-dire un «son», dont les caractéristiques conditionnent en grande partie le son perçu (aigu, grave...). Les différents paramètres physiques de l'objet vibrant, tels sa forme et le matériau dont il est fait, régissent la vibration. De fait, nous distinguons les yeux fermés le verre du bois au son qu'ils produisent lorsqu'on les frappe. Qu'en est-il des instruments de musique?

Dans une guitare, un violon, un piano... la table d'harmonie mise en vibration grâce aux cordes est la source principale du son de l'instrument, comme la membrane d'un haut-parleur ou la peau d'un tambour. La table d'harmonie de l'instrument étant un objet tridimensionnel complexe, sa vibration est riche et ne produit pas une fréquence unique, mais tout un ensemble de fréquences. Celles-ci sont caractéristiques d'un instrument: c'est pourquoi le son



d'une guitare se distingue de celui d'un piano, même quand on y joue la même note. C'est là qu'intervient l'art du luthier.

Lors de la fabrication de l'instrument, il cherche à optimiser les modes de vibrations de la table d'harmonie, pour en obtenir le son désiré. L'artisan intervient sur la forme de la table, les matériaux qui la composent et les «barrages» (des baguettes de bois raidisseuses placées sous la table). Guidé par son expérience, le luthier est capable d'identifier à l'oreille le bon accordage de la table. La science peut également lui venir en aide.

En effet, en visualisant les formes vibratoires de la table (on parle aussi de ses modes) qui se manifestent à une fréquence précise, il aurait alors une connaissance objective des caractéristiques vibratoires impliquées dans le son de l'instrument. Une telle aide serait utile

pour accorder la table avant son assemblage, par exemple en optimisant la position des barrages pour renforcer ou atténuer certaines vibrations.

VOIR LES VIBRATIONS

Pour ce faire, des dispositifs existent, mais ils sont chers, lents et difficiles à mettre en place. Afin de palier ces inconvénients, avec des collègues acousticiens, mathématiciens et informaticiens, nous avons utilisé une technique novatrice de traitement du signal, l'«holographie acoustique compressée», pour visualiser rapidement et de façon fiable les vibrations d'un instrument de musique. La procédure consiste en plusieurs étapes: enregistrer le son de l'instrument, identifier les fréquences auxquelles il vibre et, pour chacune d'elles, analyser le champ acoustique pour reconstruire la forme vibratoire associée.

Le phénomène de vibration est complexe, car il dépend de nombreuses caractéristiques physiques et géométriques de la structure. Cependant, on peut décomposer la vibration d'une structure en une somme – une «superposition» – de vibrations élémentaires, nommées «modes propres» (voir l'encadré page 52), chacune étant associée à une fréquence spécifique.

Pour visualiser et identifier les modes propres d'une structure vibrante, deux moyens sont couramment utilisés: le calcul numérique et l'analyse expérimentale. La modélisation numérique est assez facile à mettre en œuvre, mais ses résultats dépendent de paramètres souvent mal maîtrisés, tels que les propriétés élastiques des matériaux (d'une grande variabilité en lutherie) et la nature de la liaison entre la table d'harmonie et son support. C'est pourquoi la méthode expérimentale est la plus adaptée pour mesurer directement la vibration et en identifier les modes propres. Comment procéder?

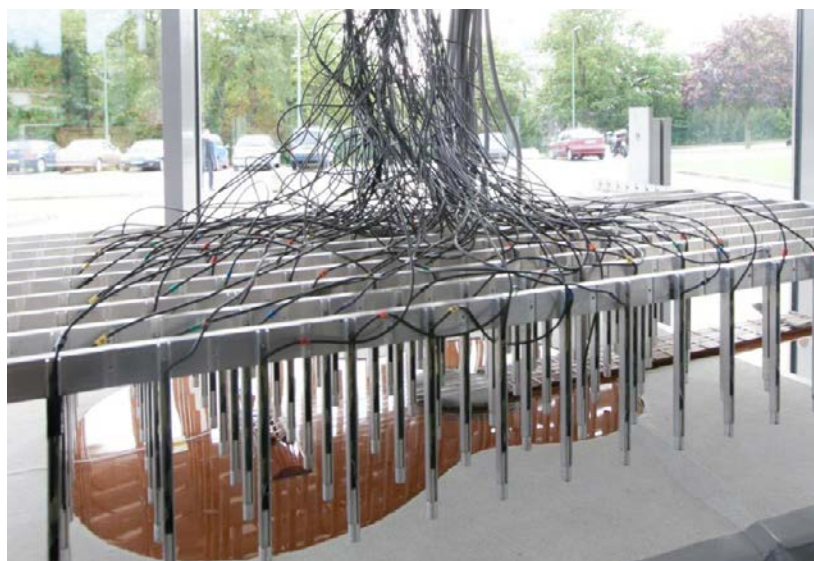
TROP CHÈRE VIBROMÉTRIE

Les premières études sur les vibrations et leur visualisation remontent au XIX^e siècle et aux travaux des physiciens allemands Ernst Chladni et August Kundt. Le premier a étudié cette question en saupoudrant des plaques de métal avec de fines particules de poussière (voir page ci-contre). Depuis, de nombreux progrès ont été réalisés dans ce domaine et l'industrie utilise couramment des systèmes de visualisation des vibrations à des fins de diagnostic en mécanique des structures. Les vibrations sont en effet source de bruit, mais aussi de contraintes mécaniques susceptibles de fragiliser et de détériorer les objets. Dans ce contexte, visualiser les vibrations permet de les comprendre pour mieux les supprimer.

Pour les visualiser, il existe une méthode très précise, mais coûteuse: la vibrométrie laser à balayage. Ce capteur scanne la structure vibrante avec un faisceau laser. Le principe est le même que celui des radars de contrôle routier. En vertu de l'effet Doppler-Fizeau, la structure en mouvement engendre un décalage de fréquence du faisceau laser réfléchi. La mesure de la différence de fréquence permet ainsi de calculer la vitesse de vibration au point visé.

À l'issue du balayage, le champ vibratoire étant entièrement mesuré, une analyse mathématique identifie les fréquences propres et les modes propres associés.

Mesurer la vitesse en un point prend plusieurs secondes. Ainsi, le balayage de la table avec un maillage centimétrique nécessite plusieurs heures (typiquement plus de huit heures pour une structure d'environ 1 mètre carré). En outre, la mise en œuvre de la vibrométrie laser nécessite un matériel lourd et coûteux (le prix d'une belle voiture de sport!).



© Consortium du projet Echange

En 2006, une équipe de chercheurs américains a utilisé cette technique pour étudier trois violons anciens d'une valeur inestimable. La prouesse est remarquable, mais la méthode reste inaccessible au luthier dans son travail quotidien.

On peut obtenir une carte des vibrations de la table d'harmonie d'une autre façon. Observons le geste du luthier: il tapote la planche de bois et écoute le son résultant. La vibration est trop rapide et d'amplitude trop faible pour qu'il puisse l'observer à l'œil nu. C'est bien son oreille, un extraordinaire instrument d'analyse du son, qui le guide. L'holographie acoustique de champ proche s'inspire de la technique du luthier: écouter le son produit, reconstruire la carte des vibrations, l'analyser et visualiser les modes propres.

Cette technique a été proposée au début des années 1980 par le physicien Julian

À l'écoute des vibrations.
Des dizaines de microphones enregistrent le son d'un instrument dont on veut étudier les vibrations. Grâce aux modèles de propagation du son, on peut reconstituer la carte des vibrations de l'objet.

**Au XIX^e siècle,
les physiciens visualisent
les vibrations avec de fines
particules de poussière**

Maynard, de l'université d'État de Pennsylvanie, et ses collègues. Elle fait appel à un ensemble de microphones constituant une « antenne » acoustique. Celle-ci est disposée à quelques centimètres de la structure, que l'on fait vibrer à l'aide d'un coup de marteau contrôlé, comme pour la vibrométrie laser. Tous les micros de l'antenne enregistrent simultanément l'onde sonore produite, depuis leurs positions respectives. En utilisant un modèle mathématique de propagation de l'onde, on remonte le temps en effectuant numériquement la propagation du son « à l'envers » – la rétropropagation – jusqu'à déterminer les vibrations de la table d'harmonie de l'instrument qui ont créé le son.

Le principe de cette opération acoustique est analogue à celui de l'holographie optique, dans la mesure où l'image enregistrée dans un plan et un modèle de propagation de la lumière permettent de connaître l'image dans un autre plan, sans la mesurer directement. Dans le cas de l'holographie acoustique, l'enregistrement sonore est notre « hologramme ». Comme pour la vibrométrie, une fois déterminé le champ vibratoire de la table d'harmonie, il est possible de retrouver les fréquences propres et les modes de vibration de l'instrument.

Dans la perspective d'assister le luthier, la méthode est séduisante : le microphone est un outil répandu, d'usage simple et assez peu coûteux. Il est en outre relativement aisé d'assembler quelques dizaines de micros pour fabriquer une antenne. On utilise couramment ce type d'instrument en imagerie acoustique, par exemple dans l'industrie automobile pour localiser les sources de bruit vers l'extérieur ou dans l'habitacle des véhicules.

Cependant, pour le luthier, le nombre de micros afin d'acquérir un hologramme suffisamment bien défini est un obstacle. Généralement, plusieurs centaines de micros sont nécessaires, ce qui est prohibitif.

Une solution alternative consiste à utiliser une antenne portant un nombre plus raisonnable de micros et à répéter la mesure pour différentes positions : on simule ainsi une antenne plus dense. Dans l'une de nos premières expériences, une antenne de 120 micros a été déplacée en 16 positions afin d'obtenir un niveau de détail suffisant pour la structure testée : une plaque plane et rectangulaire. Les 120 mesures, répétées sur 16 positions, ont produit en une quinzaine de minutes un hologramme à 1920 points à partir duquel nous avons effectué la rétropropagation numérique et identifié les modes propres.

Le dispositif est beaucoup moins coûteux qu'un vibromètre laser, mais sa mise en œuvre reste trop délicate pour un usage courant. Il faut reproduire à l'identique le coup de marteau pour chaque mesure, car la reconstruction des vibrations à partir de l'hologramme y est très

SAUPOUDRER LES VIBRATIONS

Le physicien allemand Ernst Chladni (1756-1827) a étudié les vibrations de plaques en les frottant avec un archet. Dans une version moderne de l'expérience, un haut-parleur crée les vibrations. Une poudre fine dispersée sur la plaque permet de les visualiser : elle se déplace et forme des motifs en se concentrant aux nœuds de vibration (les régions où l'amplitude de vibration est nulle). Le motif dépend du mode de vibration.



Elmar Bergeler

sensible. Pourrait-on se passer des manipulations supplémentaires et faire l'acquisition des signaux utiles en une seule opération ?

Avec une seule mesure sur chacun des 120 microphones, il n'est pas possible de reconstruire le champ de vibration avec assez de précision pour déterminer les modes propres. Le système est dit sous-échantillonné. Cependant, on peut compenser cette lacune en apportant une connaissance *a priori* de la vibration de la structure. C'est ici que la conjonction de compétences en physique, mathématiques et informatique se révèle décisive.

Il nous faut revenir à la notion de modes propres. La vibration, au premier abord complexe, peut s'expliquer comme la superposition de ces modes, chacun d'eux se manifestant à une fréquence dite de résonance et chacun ayant un coefficient de pondération. Ce premier niveau de décomposition est d'ailleurs utilisé dans les techniques d'imagerie classique précédemment évoquées. Le résultat qu'elles produisent n'est pas une image unique de la vibration, mais une série d'images de chacun de ses modes propres, dont la superposition constitue la vibration totale.

Un mode propre peut, à son tour, être décomposé en formes plus simples : des ondes planes. L'onde plane est une onde « théorique », associée à une seule fréquence et se propageant dans une seule direction ; elle ne peut exister que dans un milieu infini. Mathématiquement parlant, c'est une solution élémentaire de l'équation des ondes – équation qui régit l'évolution de la pression acoustique dans l'espace et le temps. Il existe une infinité d'ondes planes, qui diffèrent par leur longueur d'onde et leur direction de propagation. Or on montre mathématiquement que la combinaison de quelques éléments seulement de cet ensemble infini suffit pour reconstituer un mode propre avec précision. Identifier un mode propre revient donc à déterminer les quelques ondes planes principales qui le composent.

ONDES PROPRES ET PLANES

Finalement, il y a deux niveaux de décomposition. Au niveau mécanique, la vibration est d'abord considérée comme la superposition de certains modes propres. Puis, au niveau mathématique, chaque mode propre est lui-même modélisé comme la somme « parcimonieuse », c'est-à-dire d'un nombre réduit, d'ondes planes. Dans le cas de la table d'harmonie d'une guitare, une dizaine d'ondes planes suffisent.

La stratégie adoptée consiste à déterminer les ondes planes qui, d'après cette double décomposition, contribuent à la vibration de la table d'harmonie, uniquement à partir de ce que mesurent en une fois les 120 microphones de l'antenne. La théorie du traitement du signal

