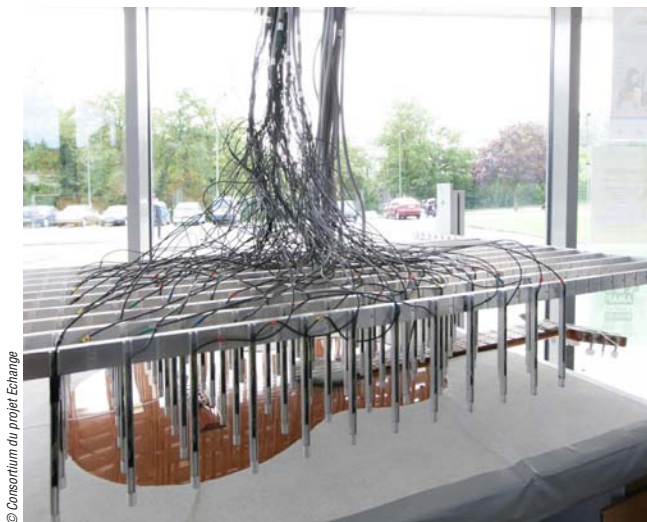
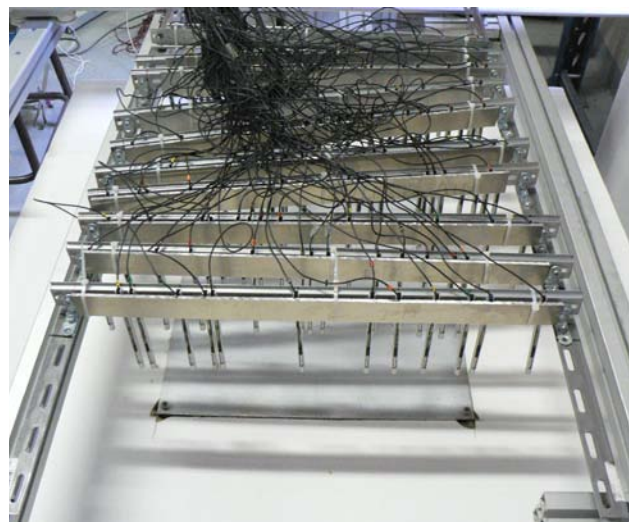




© Consortium du projet Exchange



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 méthode d'analyse mathématique – l'analyse modale – est mise en œuvre pour identifier les fréquences propres et les modes propres associés.

Des méthodes lentes et coûteuses

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 un mètre carré). En outre, la mise en œuvre de la vibrométrie laser nécessite un matériel lourd et coûteux (le prix d'une très belle voiture de sport!).

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.

Il existe une autre façon d'obtenir une carte des vibrations de la table d'harmonie. 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 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

À L'ÉCOUTE DES VIBRATIONS.

Des microphones sont disposés au-dessus de l'instrument (*à gauche*) ou de la plaque de métal (*à droite*) dont on veut étudier les vibrations. Grâce aux modèles de propagation du son, l'enregistrement permet de reconstituer la carte des vibrations de l'objet. Pour la plaque rectangulaire, de forme régulière, un positionnement aléatoire des microphones est plus efficace. Pour la guitare, dont la table d'harmonie a une forme complexe, une disposition régulière des microphones suffit.

Pour comprendre comment les chercheurs analysent les vibrations de la table d'harmonie de la guitare, il faut s'intéresser aux ondes mécaniques et acoustiques. Commençons avec le cas simple d'un objet suspendu à un ressort, qui présente une fréquence d'oscillation naturelle.

Cette fréquence est proportionnelle à la racine carrée de k/m , où m est la masse de l'objet et k est la raideur du ressort, qui mesure sa résistance à l'étirement. Si l'objet est déplacé de sa position au repos, par un choc par exemple, il entre dans un mouvement oscillant à cette fréquence, ce qu'on nomme le mode propre et la fréquence propre.

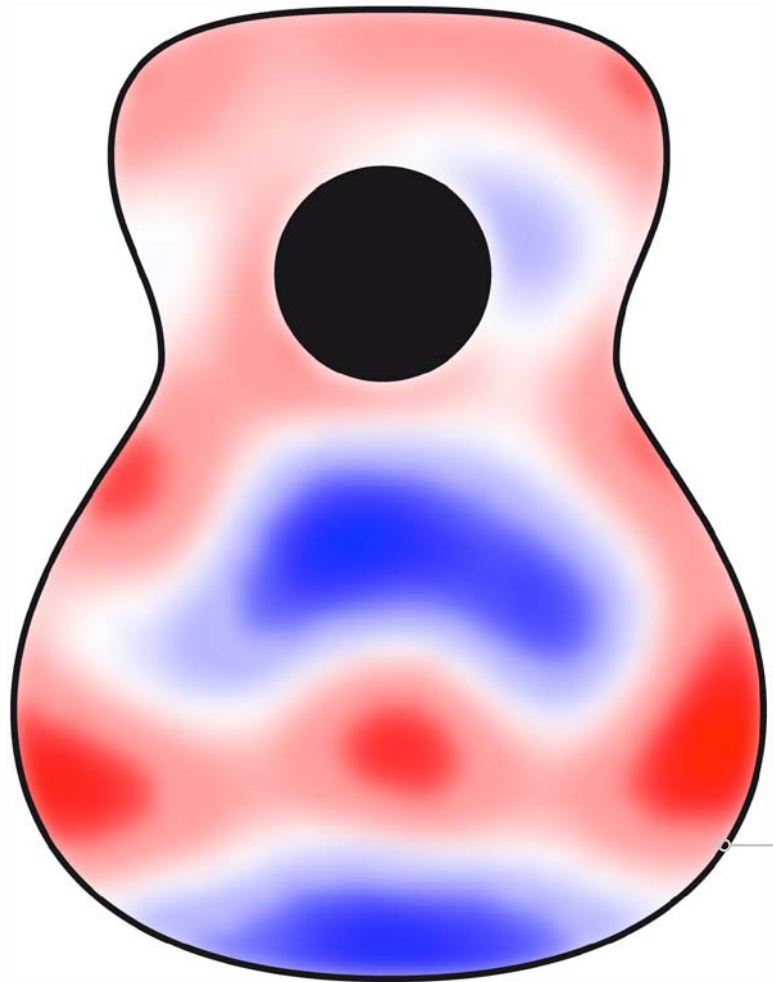
Lorsque l'objet qui vibre a une structure complexe, chacun de ses points oscille d'une façon différente. On établit une carte des vibrations. Mais celle-ci est difficile à exploiter directement. L'étude des ondes nous indique que la vibration d'une structure, telle la table d'harmonie de la guitare, est une somme, ou superposition, de plusieurs modes propres. Chaque mode propre est caractérisé par une fréquence et une certaine répartition (fixe) des nœuds et ventres de vibration, et intervient avec un certain coefficient de pondération dans la vibration globale. Les fréquences et les modes propres dépendent de la masse et de l'élasticité de la structure, de sa géométrie et de la façon dont elle est liée à son support. Il y a donc une grande variabilité d'une guitare à une autre.

Ainsi, pour étudier les vibrations d'une guitare, les acousticiens cherchent à décomposer le signal en modes propres. Le son est enregistré puis analysé par des techniques d'« imagerie acoustique », ou d'« analyse modale », pour produire une représentation visuelle du mode associé à chaque fréquence propre.

Dans la technique utilisée par les auteurs, l'enregistrement du son, plus rapide que dans les autres techniques, ne suffit pas à reconstruire une carte assez précise des vibrations pour déterminer les modes propres. La stratégie consiste alors à utiliser le fait qu'un mode propre se décompose à son tour en une somme d'ondes planes. Ces dernières sont des ondes élémentaires idéales, dont le front d'onde (l'ensemble des points de l'espace dont l'état vibratoire est exactement le même) est un plan infini et perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

Tout l'art de la méthode réside dans la détermination des ondes planes qui seront utiles pour reproduire les vibrations de la guitare.

Carte des vibrations



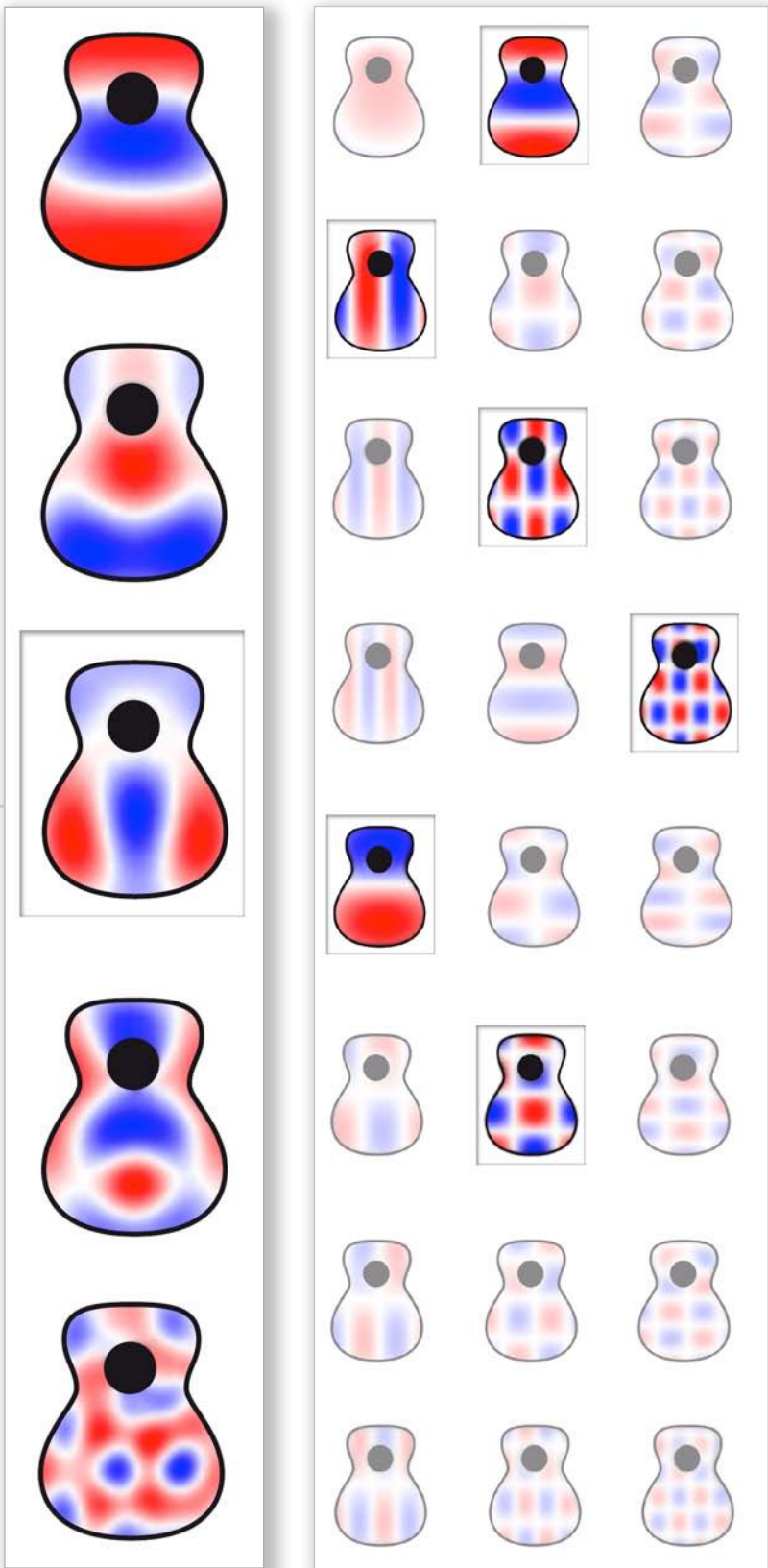
LA TABLE D'HARMONIE DE LA GUITARE vibre lorsqu'on la frappe avec un petit marteau ou que les cordes de guitare oscillent (*ci-dessus*). Les déformations élastiques de la table sont indiquées par les couleurs. Une impulsion, tel un coup de marteau, excite tous les modes propres pouvant contribuer à la vibration de la guitare. La vibration d'une seule corde n'excite qu'une partie d'entre eux.

LES MODES PROPRES (*au centre*) participent à la vibration de la table d'harmonie, mais les contributions de chaque mode diffèrent en intensité. La réponse acoustique d'un instrument donné est unique, car de nombreux paramètres physiques de la structure interviennent.

CHACUN MODE PROPRE se décompose en une somme de plusieurs ondes planes (*à droite*), qui sont des objets mathématiques. Dans l'approche des auteurs, un algorithme sélectionne des ondes planes dans un catalogue comprenant un grand nombre de ces objets. La superposition de ces ondes doit reproduire la table des vibrations obtenues grâce à l'enregistrement des microphones. Le processus est répété pour réduire le nombre d'ondes planes nécessaires. Ici, les ondes planes en surimpression (*à droite*) contribuent au troisième mode propre (*au centre*).

Modes propres

Catalogue d'ondes planes



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.

Multiplier les mesures

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 des premières expériences que nous avons réalisées, 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 1 920 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 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