



© Sergey Uryadnikov

Les Pygmées Aka, en République centrafricaine, communiquent grâce à des yodels. Selon eux, ces sons ne deviennent de la musique qu'au village, quand ils s'appuient sur une pulsation régulière. Ailleurs, par exemple en forêt, ce ne sont que des cris.

l'arbre voisin), entendre de la musique nécessite de faire abstraction de ces causes pour relier les sons entre eux. Écouter musicalement un violon, c'est avoir l'impression que les sons arrivent «à cause» des sons qui les précèdent, et non plus du fait de crins de cheval frottant continuellement une corde tendue sur une boîte.

Ce serait là notre premier contact avec la musique: des «choses» et des «êtres» bien audibles, mais dont l'existence est quelque peu paradoxale puisqu'elle dépend de notre écoute.

Nous savons, par exemple, que les oreilles ne perçoivent pas réellement des couleurs. Même dans les cas de synesthésie les plus nets, l'impression auditive garde une signature tout à fait particulière. À un ami synesthète qui ressentait une puissante impression de bleu en entendant une harmonie de *ré* majeur, le neurologue britannique Oliver Sacks demanda ce qui se passerait s'il regardait, en même temps, un mur jaune: verrait-il du vert?

La réponse fut négative: les deux sensations coexistaient avec force pour cette personne, mais ne se mélangeaient pas. Il en va ainsi de la plupart des choses dont les humains

font l'expérience en écoutant musicalement: elles existent pour eux avec force, mais comme dans un monde à part. Ce monde sensoriel suspendu constitue, en soi, un excellent support pour accueillir toutes sortes de transactions avec des êtres et des ordres de réalité auxquels nous n'aurions normalement pas accès.

Un autre trait remarquable de l'écoute musicale est qu'elle confronte couramment les humains à des entités qui leur paraissent, dès lors, agir directement sur eux. Un exemple familier est l'impression que les sons «bougent», qu'ils sont animés d'un «mouvement» interne, qu'ils «pulsent», «balancent», «montent» ou «tournent». L'expérience est là encore paradoxale, car ces mouvements ne sont en rien ceux de la source sonore, qui peut être totalement immobile. Les mouvements musicaux s'expliquent difficilement comme des réalités physiques objectives. Les appréhender requiert un apprentissage culturellement orienté, et d'ailleurs ce qui est mouvement pour les uns (par exemple une «descente» entre un «haut» aigu et un «bas» grave) peut être entendu en d'autres endroits du monde comme une variation de luminosité (des sons «clairs» qui deviennent plus «obscur»).

Néanmoins, dès lors que l'auditeur perçoit un «mouvement» musical, cette sensation s'impose à lui comme une réalité extérieure. Il sentira par exemple que la musique est «entraînante»: qu'elle l'incite à bouger par un effet de contagion presque mécanique.

Certains vont plus loin. Pour les Tumbukas du Malawi par exemple, la sensation d'être mu par le son (littéralement d'être «dansé par les tambours») est le premier pas vers des formes de possession où des esprits dûment identifiés prennent le contrôle du corps des danseurs.

BIBLIOGRAPHIE

B. BRABEC DE MORI, *Musical spirits and powerful voices: On the origins of song, Yearbook for Traditional Music*, pp. 114-128, 2017.

J. DURING, *Diaboli in mûsiqî. Ambivalence des pratiques curatives et dévotionnelles musulmanes, Terrain*, N° 68, 2017.

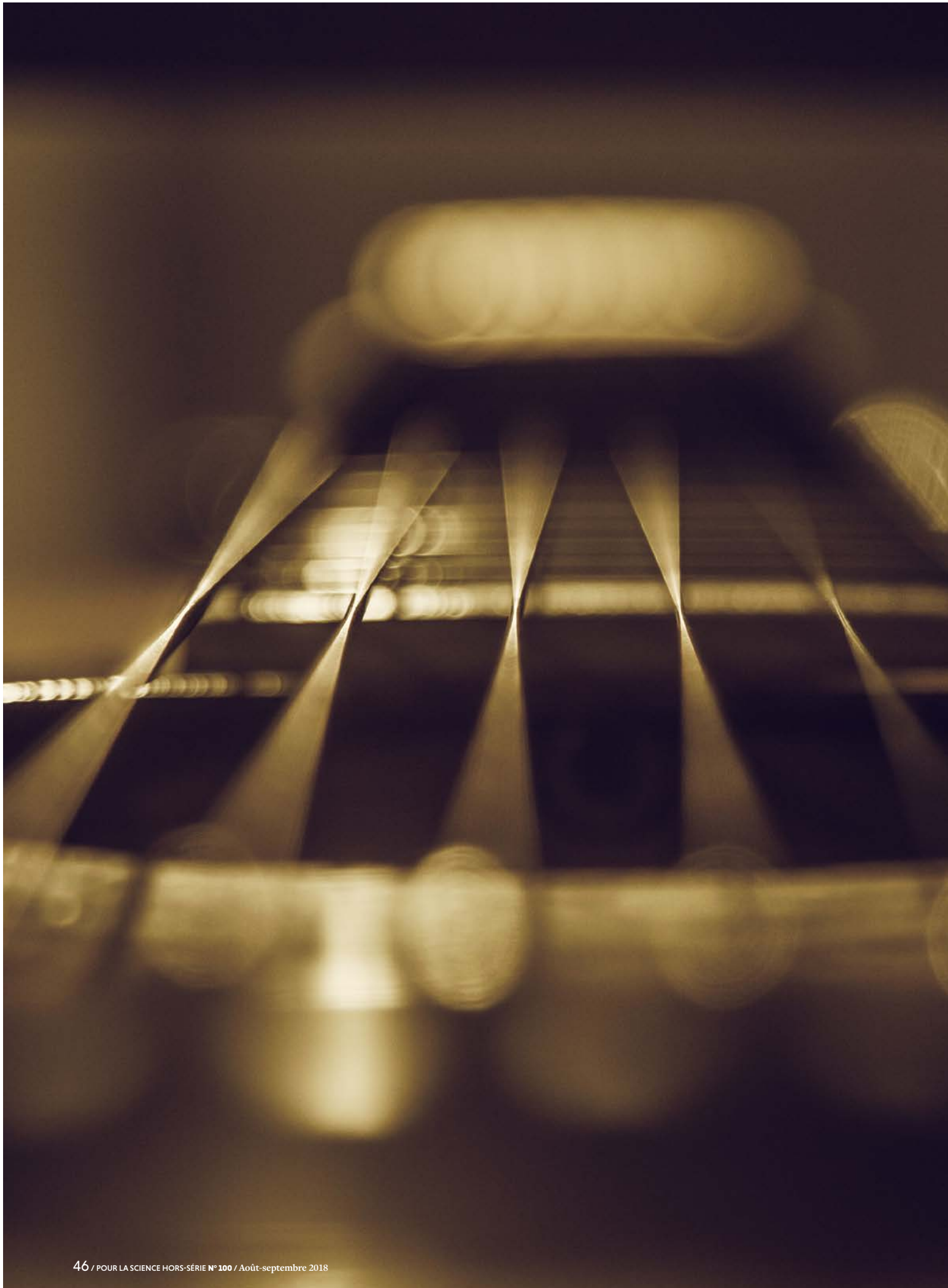
V. A. STOICHITA ET B. BRABEC DE MORI, *Postures of listening. An ontology of sonic percepts from an anthropological perspective, Terrain* (en ligne), 2017.

M. KREUTZER ET V. AEBISCHER, *The Riddle of Attractiveness: Looking for an 'Aesthetic Sense' Within the Hedonic Mind of the Beholders, Current Perspectives on Sexual Selection, Dordrecht: Springer*, pp. 263-287, 2015.

ENCHANTER LE MONDE

L'écoute musicale se prêterait ainsi doublement aux enchantements et supputations métaphysiques dont les humains, probablement plus que toute autre espèce, sont coutumiers. D'une part en peuplant notre audition d'êtres dont l'existence est toujours quelque peu paradoxale et incertaine. D'autre part, en conférant à ces êtres la capacité d'agir sur nous et dans notre monde.

Rien ne permet de croire que cette capacité de transformation serait une réalité physique objective que certains sons ou structures sonores possèderaient intrinsèquement. Chaque culture humaine investit en revanche certains types de sons (à chaque fois différents) du pouvoir d'opérer ce genre de transformations objectives. Pour trouver la musique en tant que capacité humaine partagée, il faudrait alors regarder moins vers les modes d'organisation des sons que vers notre propension commune à écouter le monde d'une manière littéralement enchantée. ■





ÉMETTRE LES BONNES VIBRATIONS

Comment faire qu'un instrument émette les meilleurs sons possible ? Quels phénomènes vibratoires sont en jeu lorsqu'on en joue ? Les physiciens se sont penchés sur le fonctionnement détaillé des instruments pour le comprendre et l'améliorer. Les luthiers en profitent ! On peut même aller plus loin. Grâce aux connaissances acquises, on peut créer des instruments de musique virtuels et pourtant réalistes, et même faire entendre des instruments imaginaires. Ce n'est pas une raison pour délaisser ceux qui existent : parmi eux se cachent des trésors.

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

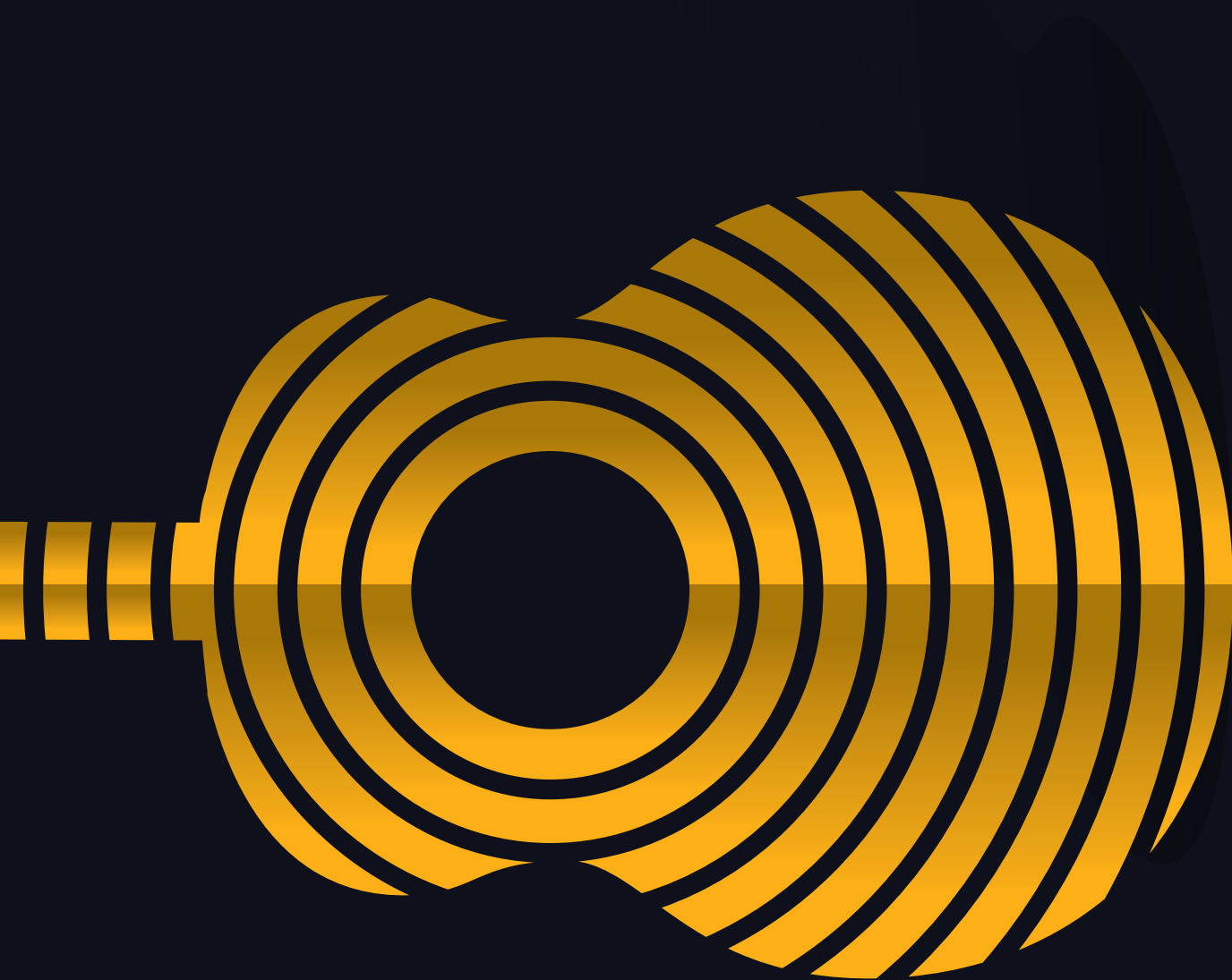
Lorsqu'il fabrique un instrument, le luthier le peaufine en écoutant les sons que ses vibrations produisent. Une nouvelle technique d'analyse et de visualisation des vibrations – l'holographie acoustique – lui faciliterait la tâche.

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?

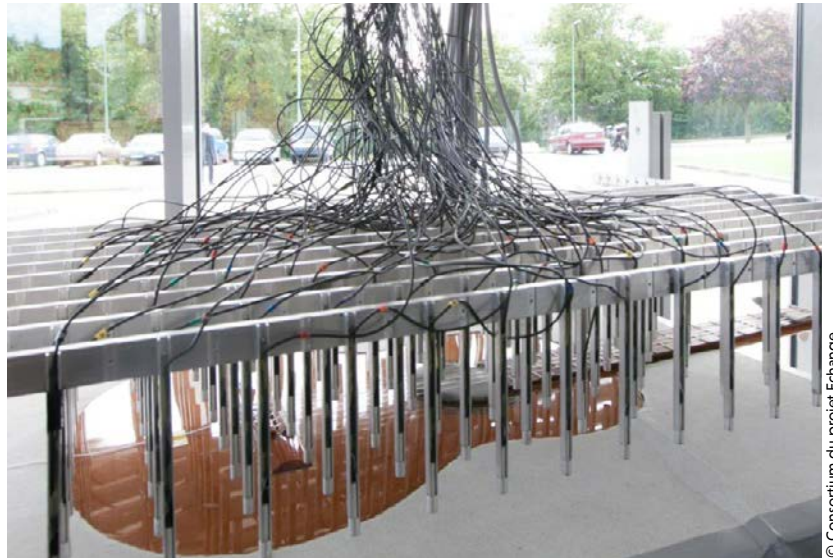
TROP CHÈRE VIBROMÉTRIE

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

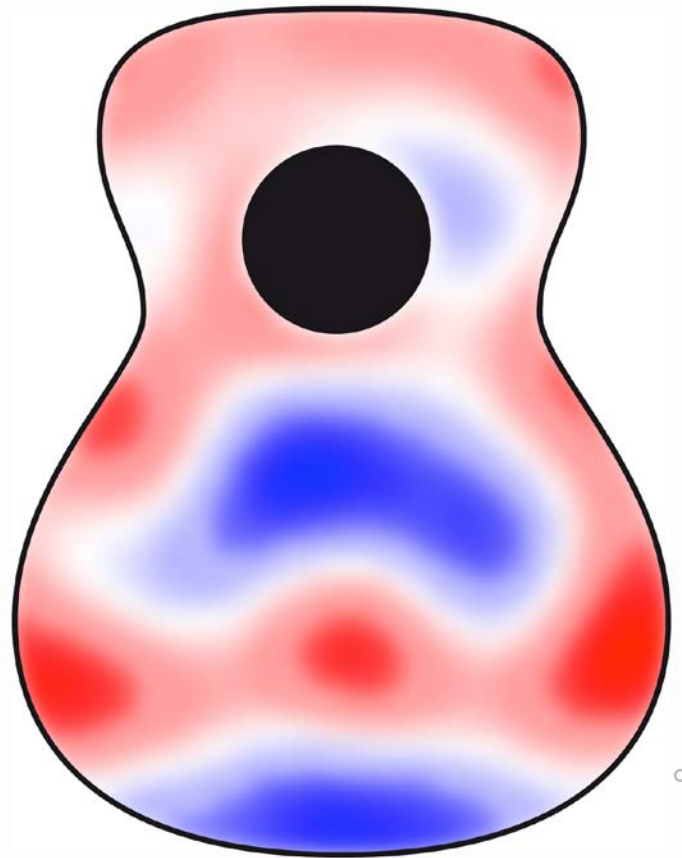
Finalement, il y a deux niveaux de décomposition. Au niveau mécanique, la vibration est d'abord considérée comme la superposition de certains modes propres. Puis, au niveau mathématique, chaque mode propre est lui-même modélisé comme la somme « parcimonieuse », c'est-à-dire d'un nombre réduit, d'ondes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

VIBRATIONS DÉCOMPOSÉES

Pour comprendre comment les chercheurs analysent les vibrations de la table d'harmonie de la guitare, on doit s'intéresser aux ondes mécaniques et acoustiques. Commençons avec le cas 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 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 désigne par mode propre et 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 décrite dans l'article 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 (*ci-contre*) contribuent 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. Un algorithme sélectionne des ondes planes dans un catalogue 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 contribuent au troisième mode propre.



nous assure qu'il est possible de reconstruire le champ vibratoire avec une précision comparable à celle de la vibrométrie laser et de l'holographie acoustique classique. Cela est faisable grâce au caractère parcimonieux en ondes planes des modes propres de vibration.

Si les ondes planes pertinentes avaient été nombreuses, 120 mesures auraient été insuffisantes pour contraindre correctement les combinaisons possibles. Ainsi, la combinaison la plus parcimonieuse d'ondes planes nous donne accès au champ vibratoire de la table d'harmonie, et par suite aux modes propres. Cette approche est nommée holographie acoustique compressée, en référence à une technique mathématique récente également appliquée en imagerie médicale ou en radioastronomie : l'échantillonnage compressé (*voir l'encadré page suivante*).

Le calcul de la combinaison optimale (la plus parcimonieuse) d'ondes planes repose sur des algorithmes d'optimisation numérique qui, bien que complexes, sont à la portée des ordinateurs de bureau actuels.

Comment détermine-t-on les ondes planes qui composent la vibration de l'instrument de musique? En théorie, le nombre d'ondes planes possibles est infini, la direction et la longueur d'onde pouvant prendre n'importe quelles valeurs. Comme cela n'est pas gérable dans un programme numérique, nous utilisons un catalogue fini d'ondes planes, avec des valeurs discrètes de direction et de longueur d'onde (de l'ordre d'une centaine d'ondes planes). L'échantillonnage compressé permet de sélectionner rapidement un certain nombre d'ondes planes dont la combinaison reproduit correctement les 120 mesures.

Le principe de parcimonie est crucial dans l'algorithme utilisé. Le programme cherche à minimiser le nombre d'ondes nécessaires pour reproduire le signal enregistré. La combinaison la plus parcimonieuse d'ondes planes nous donne accès au champ vibratoire de la table d'harmonie. À partir de là, nous pouvons calculer les modes propres.

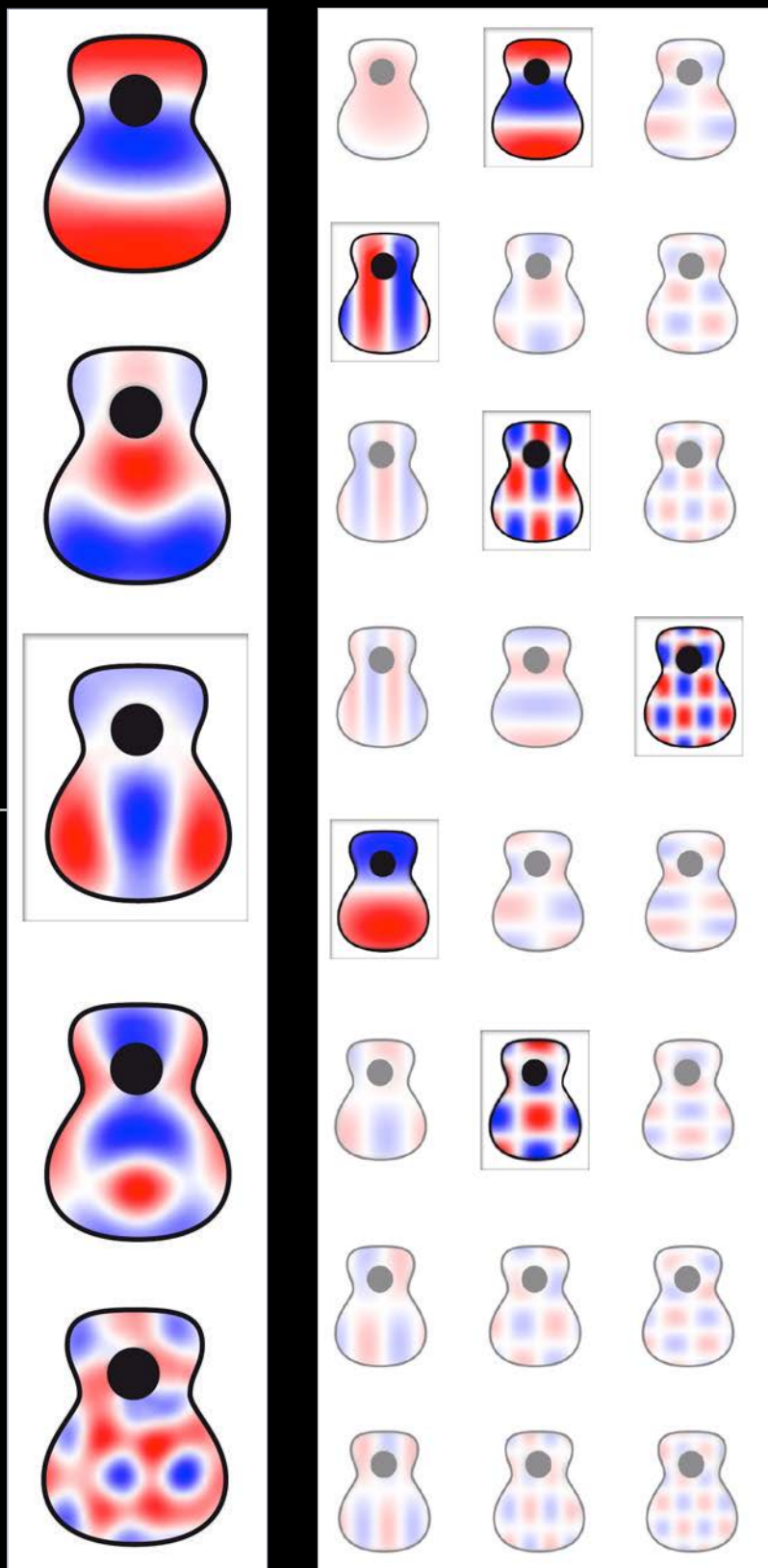
DES MICROS DANS LE DÉSORDRE

Reste une question: comment disposer les 120 microphones de l'antenne? De façon un peu contre-intuitive, les algorithmes compressés fonctionnent mieux lorsque la répartition des microphones de l'antenne est irrégulière, ou bien lorsque la forme de la structure vibrante est elle-même complexe, comme c'est le cas de la table d'harmonie d'une guitare (*voir la photo page 50*). Pour quelle raison?

Les ondes ont une structure périodique. Ainsi, si nous répartissons les microphones de façon régulière, nous risquons d'avoir une redondance dans l'information et ne pas en avoir assez pour reconstruire correctement

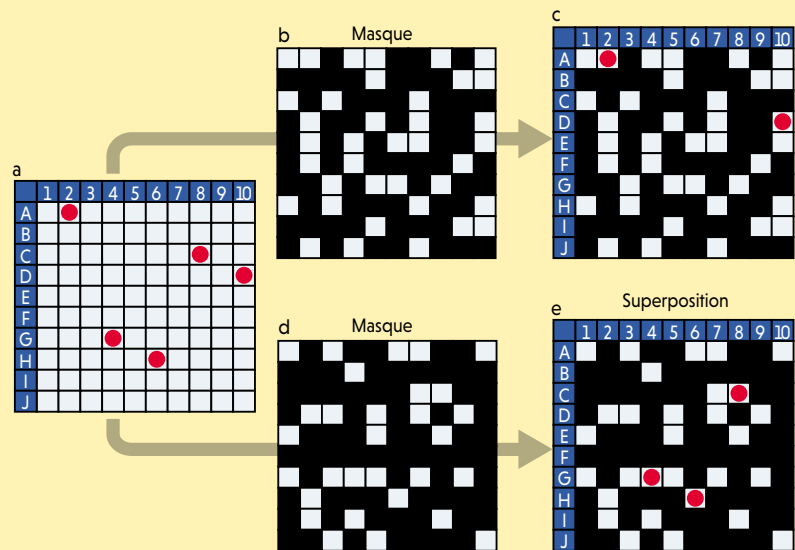
MODES PROPRES

CATALOGUE D'ONDES PLANES



BATAILLE NAVALE ET ÉCHANTILLONNAGE

Pour comprendre le principe de l'échantillonnage compressé, prenons une analogie simple: le jeu de la Bataille navale, que nous allons encore simplifier en considérant que les cinq bateaux n'occupent qu'une seule case chacun, dans une grille de 10 x 10. Le but du jeu est de retrouver la position de tous les bateaux ennemis en posant le minimum de questions, chacune testant une case à la fois: A7? F4? On s'aperçoit vite que cette façon de sonder l'ensemble de la grille n'est pas très efficace: presque tous les coups « tombent à l'eau » et, en fin de compte, il ne faudra pas beaucoup moins de 100 questions pour finir la partie (il faut en moyenne 84 questions). Pour être plus efficace – en faisant abstraction des règles du jeu! –, il faut que chaque question nous renseigne simultanément sur plusieurs positions spatiales: par exemple, « y a-t-il au moins un bateau sur la colonne D? Sur la ligne 7? » C'est mieux, car on a ainsi des chances d'éliminer toute une série de cases en une seule question. L'étape suivante est de poser une question qui nous renseigne, certes de façon imparfaite, sur l'ensemble de la grille. Nous utilisons alors des méthodes liées aux nombres aléatoires. Par exemple, construisons un « masque binaire », de même taille 10 x 10 que la grille, avec autant de cases opaques que de cases transparentes, réparties aléatoirement. Les nouvelles questions seraient: « À travers ce masque, combien peut-on voir de bateaux? Et à travers cet autre masque? » Avec une vingtaine de ces masques et les réponses correspondantes, un petit programme numérique ne met que quelques



Dans une bataille navale simplifiée avec cinq bateaux rouges sur une grille (a), tester chaque case l'une après l'autre n'est pas la meilleure stratégie pour trouver tous les bateaux. On gagne en efficacité en utilisant des masques non réguliers (b et d). Chacun fournit un certain nombre d'informations (c et e). On retrouve la position de tous les navires avec quelques masques et en superposant les informations recueillies avec chacun.

secondes pour retrouver entièrement la grille de l'adversaire. Le nombre de « questions » a été divisé par quatre! La performance n'est cependant pas toujours au rendez-vous. Cela ne fonctionne ici que parce que le nombre de bateaux est faible par rapport à la taille de la grille: seules 5% des cases sont occupées. En mathématiques, cette propriété est nommée parcimonie: un objet complexe (telle une grille de Bataille navale) peut être décrit comme la somme d'un très petit nombre d'objets élémentaires. D'une façon générale, la théorie de l'échantillonnage compressé, développée il y a une dizaine d'années, décrit comment acquérir le plus

efficacement possible des données complexes, sachant qu'elles vérifient la propriété de parcimonie. Dans le cas de l'holographie acoustique compressée, on sait a priori que notre donnée inconnue (un mode propre) se décompose comme une somme d'un petit nombre de formes élémentaires (des ondes planes) parmi une infinité – ou au moins un catalogue important – d'ondes planes. Le but est de retrouver cette combinaison: on ne sait pas ce qu'elle est, on sait juste qu'elle existe et qu'un petit nombre d'observations judicieusement placées peut la révéler.

> la carte des vibrations. Il faut répartir de façon aléatoire les microphones pour maximiser l'information de l'hologramme. Lorsque la surface est régulière, nous plaçons en pratique les microphones de façon irrégulière, mais raisonnable par rapport aux contraintes physiques de la structure de l'antenne et nous vérifions que l'information enregistrée sera suffisante. En revanche, si la surface vibrante est de forme irrégulière, l'information est maximisée même avec un placement régulier de micros. Ce principe, dit d'incohérence, est crucial pour que l'algorithme de reconstruction parcimonieuse fonctionne bien; il impose donc des contraintes lors de l'enregistrement du son.

Dans le cas d'une table d'harmonie de guitare, le résultat de l'holographie compressée est excellent: avec une antenne de quelques dizaines de micros et une seule mesure, les modes de vibration sont parfaitement identifiés. Ainsi, en « transférant » une partie de la complexité depuis le matériel vers le logiciel, nous obtenons une technique rapide (deux secondes pour l'acquisition, quelques minutes de calcul), peu onéreuse (moins de micros, possibilité dans un futur très proche d'utiliser des micros numériques similaires à ceux des téléphones portables, très peu coûteux) et simple à mettre en place.

Reste à savoir si la technique sera adoptée dans le monde de la lutherie, et plus largement par celui de l'imagerie acoustique... ■

BIBLIOGRAPHIE

J. ESPIAU DE LAMAËSTRE ET AL., Écouter pour voir, *Interstices* (revue numérique): <http://bit.ly/inters-EPV>

G. CHARDON ET AL., Nearfield acoustic holography using sparsity and compressive sampling principles, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 132, 1521, 2012.

C. BARDOS, Les ondes, entre physique et mathématiques, *Pour la Science*, n° 409, novembre 2011.

**OFFRE
DURÉE
LIBRE**

2 FORMULES / AU CHOIX

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

PAG18STDOS

PPV6E50

BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

4 / MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire.