

avec des températures moyennes plus élevées, elles entraîneront des carences hydriques, pouvant bloquer les processus de maturation, voire, à l'extrême, faire mourir des pieds de vigne. Les vignerons devront trouver quelles nouvelles pratiques culturales conviennent pour chaque terroir, et retrouver de meilleurs rendements malgré le manque d'eau.

Cette nécessité est déjà forte en Languedoc, alors qu'en Champagne par exemple, on peut au contraire gagner en rendement par rapport au passé. En Languedoc, dans le Var, etc. on se met à l'irrigation, désormais plus facile à mettre en œuvre légalement, y compris pour les AOC ; dans d'autres régions où l'hygrométrie se maintient malgré la chaleur, c'est le développement des maladies telles que l'oïdium ou le mildiou qui devient plus problématique.

PLS

Quelles sont les innovations techniques sur lesquelles les viticulteurs s'appuient ?

J.-M. T. : Les viticulteurs adoptent des techniques venues d'autres vignobles ou de la recherche, et les ajustent à leurs terroirs. L'étude fine des terroirs révèle l'existence d'une diversité de sols et de températures, diversité qui peut être mise à profit pour repenser la localisation des cépages et des techniques, par exemple en plantant des vignes plus en altitude. Outre cette optimisation locale, des jeunes entreprises comme Fruition Sciences, à Montpellier, développent des outils d'aide à la décision pour une irrigation de précision, afin d'économiser l'eau. Dans le cadre du gros projet *Aqua Domitia*, on prépare en Languedoc l'irrigation de 4000 hectares avec l'eau du Rhône. À l'Inra, nous travaillons aussi à la récupération des eaux des stations d'épuration pour irriguer les vignes.

D'autres innovations sont possibles à l'échelle de la parcelle, par exemple en amendant les sols, en essayant de nouvelles tailles qui produisent plus de feuillage au-dessus des grappes, en plantant des arbres fruitiers dans les vignes, en les protégeant du soleil par des filets anti-grêle, etc. Un producteur catalan a même installé des panneaux photovoltaïques au-dessus de ses vignes...

Il y a ensuite l'adaptation cœnologique. Les machines à vendanger

facilitent la récolte de nuit, ce qui permet d'éviter les températures trop élevées et l'oxydation prématurée des raisins. Par ailleurs, des corrections œnologiques permettent de désalcooliser le vin – en utilisant par exemple l'osmose inverse et des membranes – ou de l'acidifier en retirant des cations par électrolyse.

PLS

A-t-on recours au génie génétique ?

J.-M. T. : Nous ne travaillons pas pour mettre des OGM dans les vignes, mais la génomique permet de repérer et de marquer les gènes intéressants, par exemple pour l'adaptation à la sécheresse, puis d'accélérer les processus de sélection ou de création de variétés. Il ne s'agit pas de manipulations génétiques.

PLS

Comment alors accélère-t-on cette sélection ?

J.-M. T. : Nous disposons d'au moins 2300 cépages de la vigne du vin (*Vitis vinifera*) que nous pouvons croiser, et d'autres espèces du genre *Vitis* avec lesquelles on peut créer des hybrides mieux adaptés au réchauffement climatique. À l'Inra, nous avons accéléré l'étude du matériel végétal en mettant au point des outils de phénotypage à haut débit de jeunes vignes, en suivant le comportement de pousses installées sur des tapis roulants, afin de les observer de façon quasi automatique avant de trier les données d'observation à grande vitesse.

Comme on a déjà créé des variétés résistantes aux maladies, on en recherche qui supportent mieux le stress hydrique, qui sont plus tardives ou moins productives en sucre, etc. Une certaine expérience de l'introduction de nouveaux cépages existe déjà : le marselan, créé en 1961 par l'Inra en croisant du cabernet sauvignon et du grenache noir, a été introduit en Languedoc, dans la vallée du Rhône, en Espagne, dans le Nord de la Californie, en Suisse et en Israël. Son introduction réussie dans plusieurs vignobles illustre ce que nous pourrions faire en sélectionnant des variétés adaptées au changement climatique, si le besoin s'en fait sentir.

*Propos recueillis
par François SAVATIER*

L'Inra teste les vins du futur

Pour s'adapter au changement climatique, les vignerons ont besoin de savoir si les vins plus alcooliques, moins acides et dotés de nouveaux arômes seront acceptés ou pas par les consommateurs. L'Inra s'en préoccupe déjà et teste les réactions des consommateurs aux « vins du changement climatique ». « Il importe par exemple de savoir si l'évolution des bordeaux vers des arômes de fruits cuits, plutôt que de fruits frais comme c'est le cas aujourd'hui, est acceptée par les consommateurs, ou s'il faudra corriger pour maintenir les caractéristiques actuelles de ces vins », explique Jean-Marc Touzard.

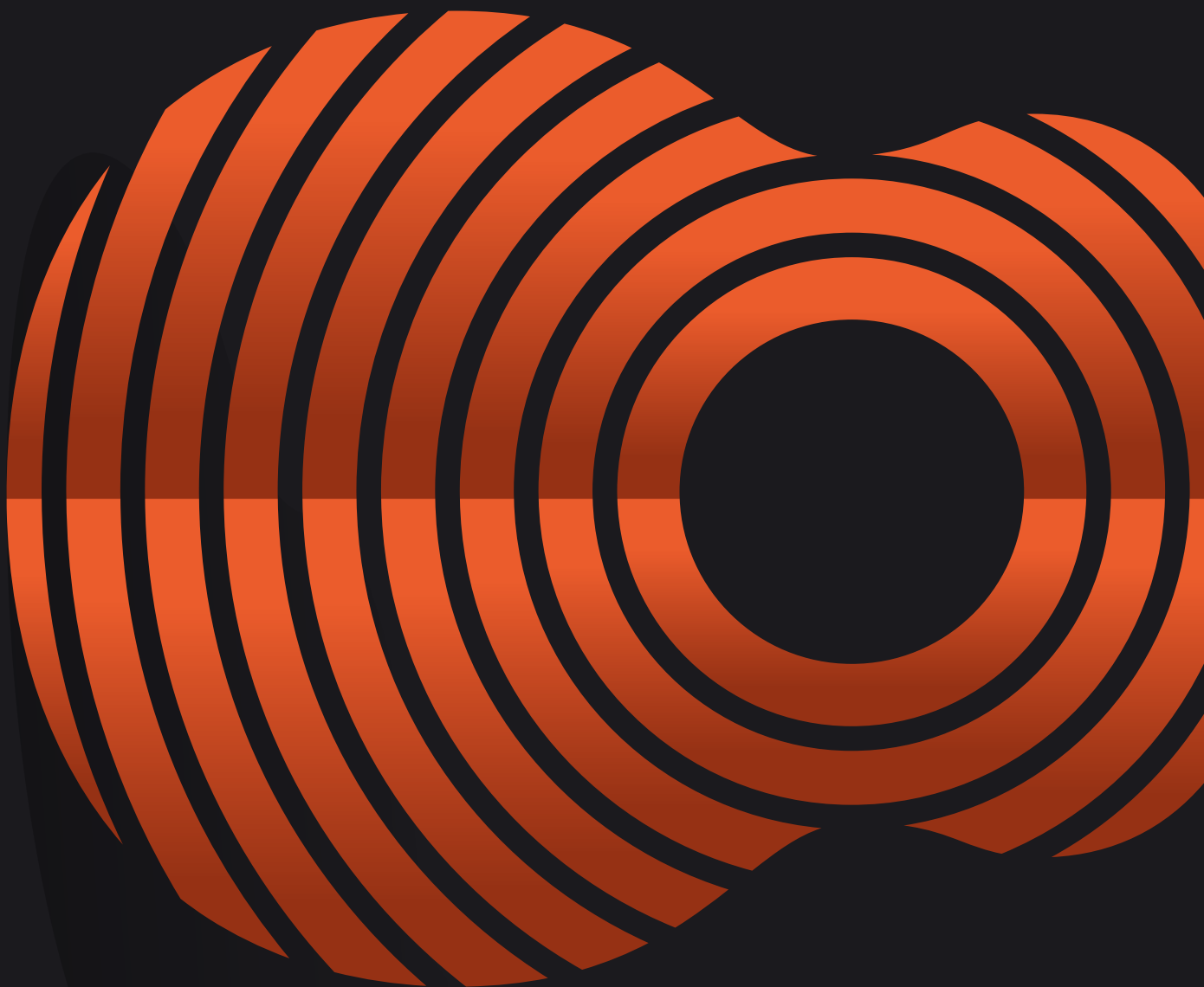
« Mon collègue Éric Giraud-Héraud et son doctorant Alejandro Fuentes ont ainsi testé la réaction du public à des vins ayant 15 °C d'alcool, moins d'acidité, provenant de raisins surmûris... mais aussi corrigés par désalcoolisation ou acidification. »

Quels sont les premiers résultats ? Dans le cas des bordeaux par exemple, on constate que les consommateurs peu experts préfèrent dans un premier temps les vins du changement climatique, maisaturent plus vite qu'avec les vins actuels. Les connaisseurs, eux, tendent à résister aux vins nouveaux ou corrigés. Des expériences similaires viennent d'être menées avec des blancs et des rouges du Languedoc, et l'étude se poursuit.

L'holographie

un nouvel outil

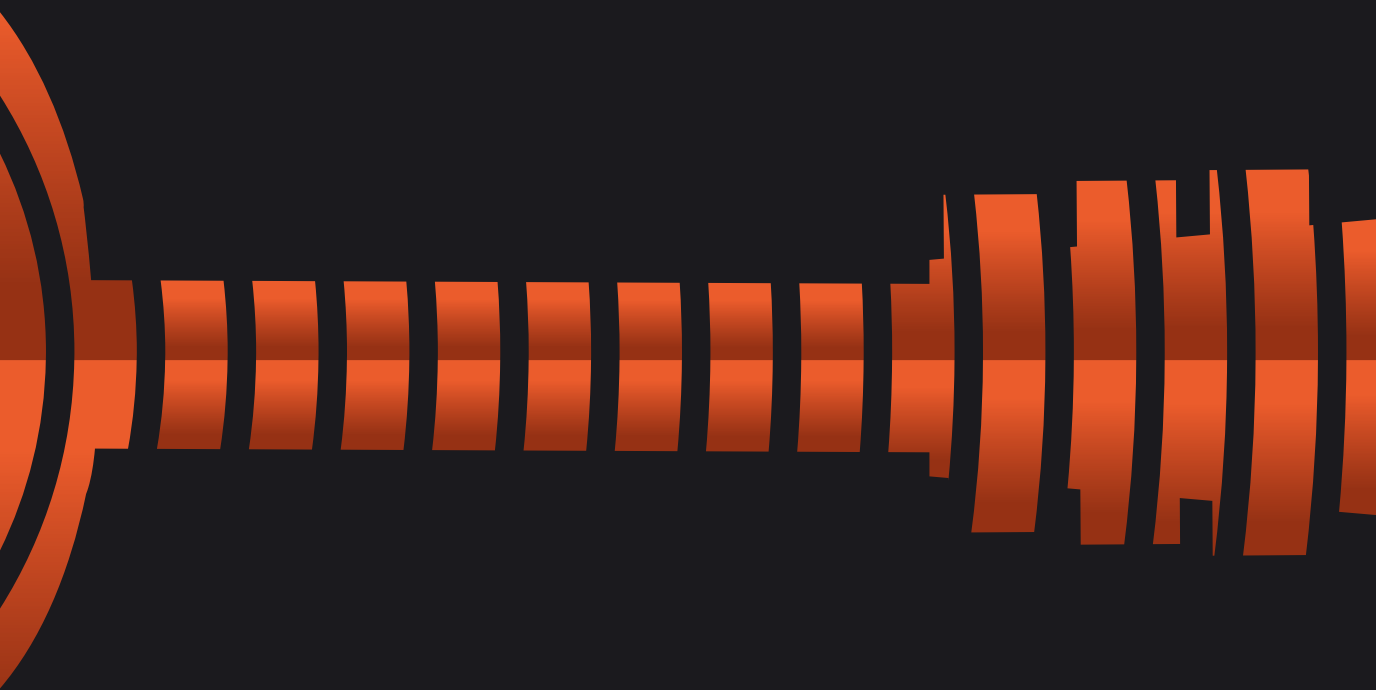
N. Bertin, L. Daudet, R. Gribonval et F. Ollivier



acoustique

pour les 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 lui faciliterait la tâche.



Toc toc toc ! 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 ». Les caractéristiques de l'onde conditionnent en grande partie le son perçu. Par exemple, la fréquence d'oscillation de l'onde détermine si le son est aigu ou grave. Les différents paramètres physiques de l'objet vibrant, tels sa forme et le matériau dont il est fait, régissent la vibration. Ainsi, nous distinguons les yeux fermés un objet en verre d'un autre en bois au simple son qu'ils produisent lorsqu'on les frappe.

Il en va de même pour la table d'harmonie d'une guitare, d'un violon ou d'un piano. Mise en vibration grâce aux cordes, elle 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.

Lors de la fabrication de l'instrument, l'art du luthier consiste, pour une part, à optimiser les modes de vibrations de la table d'harmonie, pour en obtenir le son qu'il attend. L'artisan intervient alors sur la forme de la table, les matériaux qui la composent et les « barrages » (des baguettes de bois raidisseuses placées sous la table). Le luthier est capable d'identifier à l'oreille le bon accordage de la table ; son savoir-faire le guide pour obtenir le son désiré.

Cependant, il pourrait lui être utile de visualiser 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.

Pour parvenir à cette identification, des dispositifs existent, mais ils sont chers, lents et difficiles à mettre en place. Est-il possible de développer un outil performant et utilisable par le luthier ? Avec des collègues acousticiens, mathématiciens et informaticiens, nous avons utilisé une

■ LES AUTEURS

Nancy BERTIN est chargée de recherche CNRS à l'Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires (Irisa) de Rennes.

Laurent DAUDET est professeur à l'Institut Langevin de l'Université Paris-Diderot.

Rémi GRIBONVAL est directeur de recherche Inria à l'Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires (Irisa) de Rennes.

François OLLIVIER est maître de conférences à l'Institut d'Alembert de l'Université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris.

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.

Pour le luthier, voir la forme vibratoire de la table d'harmonie serait une aide afin de l'accorder avant son assemblage, par exemple en optimisant la position des barrages pour renforcer ou atténuer certaines vibrations.

Le phénomène de vibration est complexe, car il dépend de nombreuses caractéristiques physiques et géométriques de la structure. Cependant, des résultats classiques de mécanique montrent que l'on peut décomposer la vibration d'une structure en une somme – une « superposition » – de vibrations élémentaires, nommées « modes propres » (voir l'encadré page 40), 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 les résultats qu'elle produit 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 ?

Voir les vibrations, un problème ancien

Les premières études sur les vibrations et leur visualisation remontent aux travaux des physiciens allemands Ernst Chladni (1756-1827) et August Kundt (1839-1894). Le premier a étudié cette question en saupoudrant des plaques de métal avec de fines particules de poussière (voir page 43). 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

L'ESSENTIEL

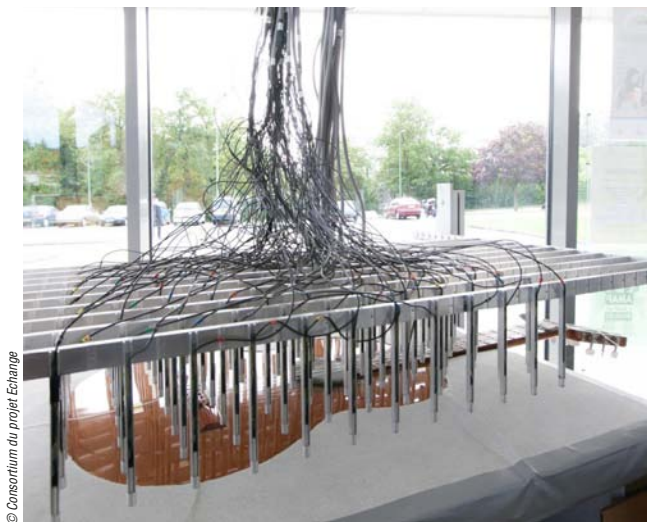
■ Les luthiers s'appuient sur un savoir-faire traditionnel pour évaluer le son des instruments qu'ils perçoivent et façonnent à l'oreille.

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

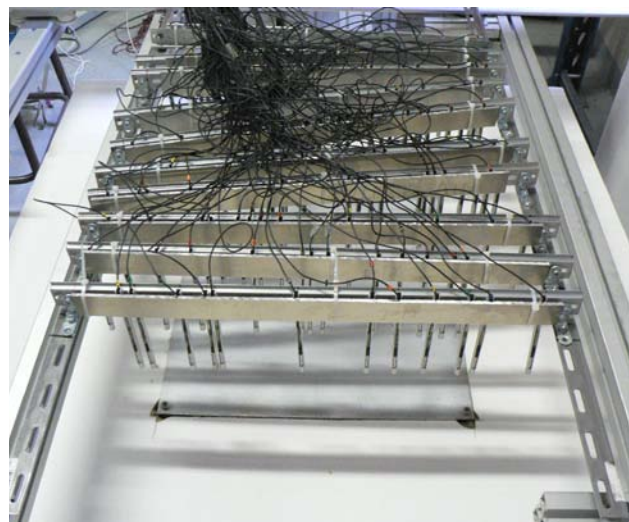
■ Des chercheurs ont développé une technique de visualisation rapide et fiable des modes de vibration : l'holographie compressée.

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

Page précédente : © shutterstock/Arak Ratanavittakorn



© 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.

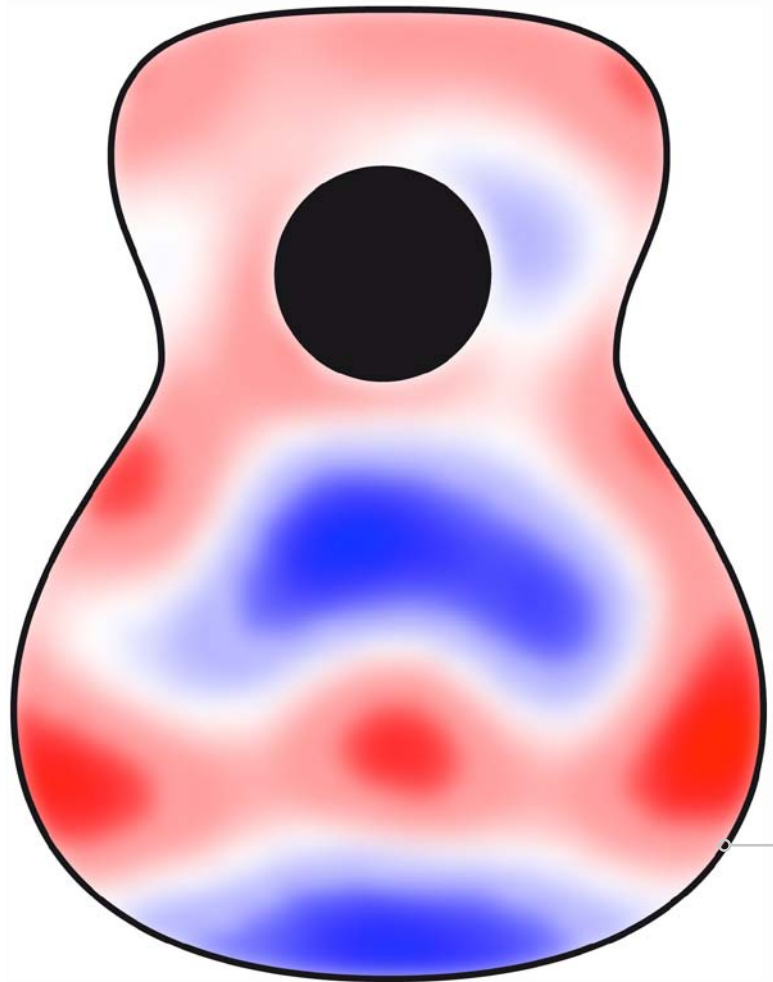
Lorsque l'objet qui vibre a une structure complexe, chacun de ses points oscille d'une façon différente. On établit une carte des vibrations. Mais celle-ci est difficile à exploiter directement. L'étude des ondes nous indique que la vibration d'une structure, telle la table d'harmonie de la guitare, 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



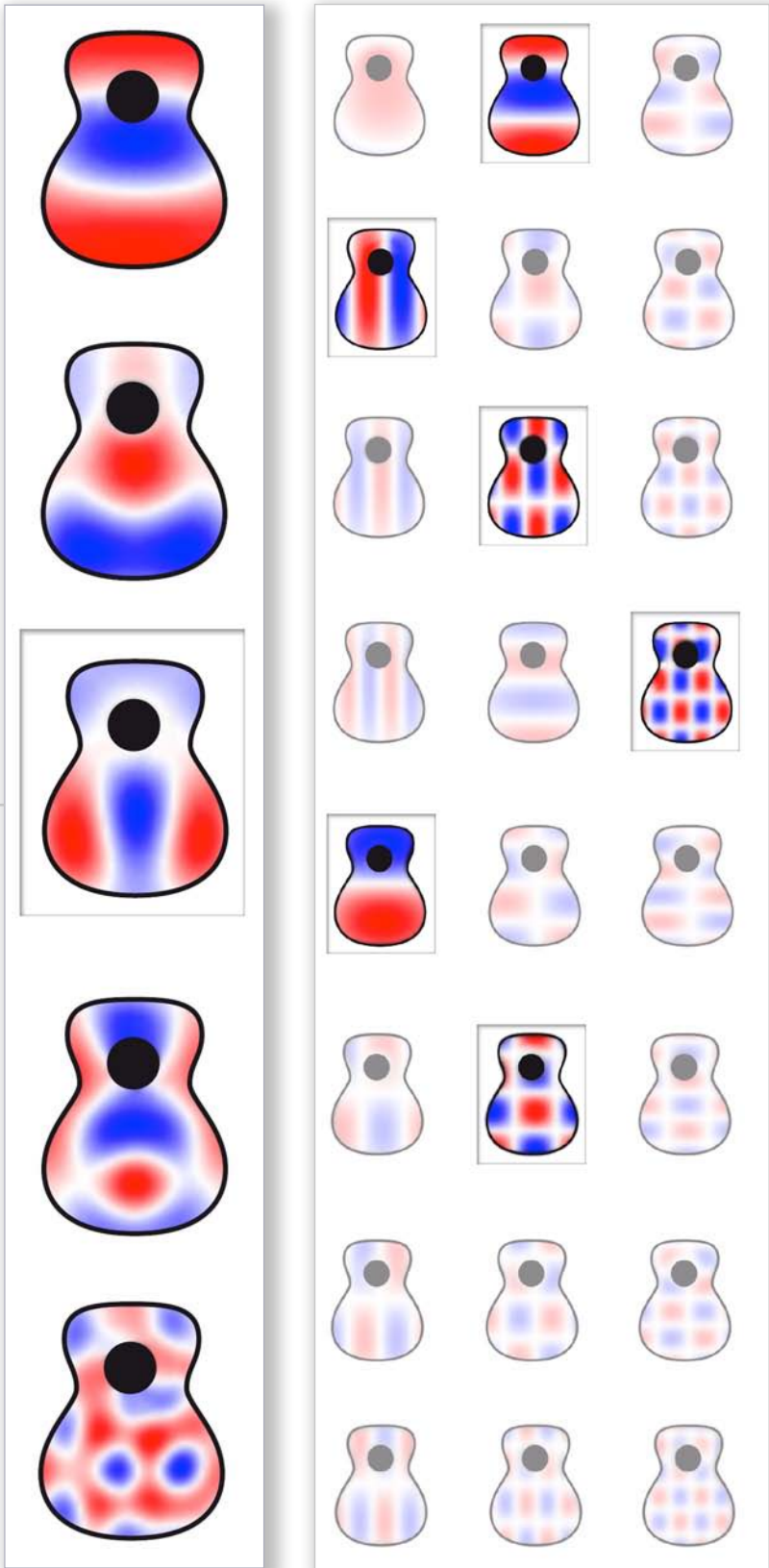
LA TABLE D'HARMONIE DE LA GUITARE vibre lorsqu'on la frappe avec un petit marteau ou que les cordes de guitare oscillent (ci-dessus). Les déformations élastiques de la table sont indiquées par les couleurs. Une impulsion, tel un coup de marteau, excite tous les modes propres pouvant contribuer à la vibration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

Échantillonnage compressé et parcimonie

Pour comprendre le principe de l'échantillonnage compressé, commençons par 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

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 (voir ci-dessous). Les nouvelles questions

rapport à la taille de la grille : seules 5 % des cases sont occupées. En mathématiques, cette propriété est nommée la 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

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.

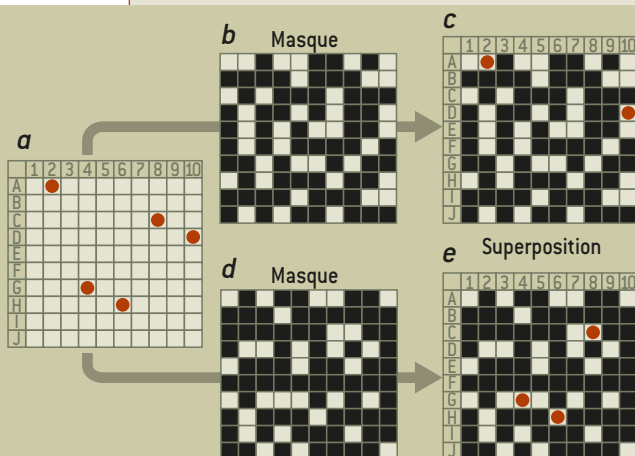
Il nous faut revenir ici à la notion de modes propres. La vibration, au premier abord complexe, peut s'expliquer comme la superposition de ces modes, chacun d'eux se manifestant à une fréquence dite de résonance et chacun ayant un coefficient de pondération. Ce premier niveau de décomposition est d'ailleurs 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.

Compléter l'information avec des ondes planes

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.

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, participent à la vibration de la table d'harmonie, uniquement à



DANS UNE BATAILLE NAVALE simplifiée avec cinq bateaux noirs sur une grille (a), tester chaque case l'une après l'autre n'est pas la meilleure stratégie. On gagne en efficacité si on teste par ligne ou par colonne la présence d'un bateau et on recoupe les informations. On est d'autant plus performant 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.

100 questions pour finir la partie (en moyenne, il faut 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

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 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

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.

– N. B., L. D., R. G. et F. O.

partir de ce que mesurent en une fois les 120 microphones de l'antenne. La théorie du traitement du signal 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 42). 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.

Figures de Chladni

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 (ci-dessous) en se concentrant aux nœuds de vibration (les régions où l'amplitude de vibration est nulle). Le motif dépend du mode de vibration.



Elmar Bergler

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.

Reste une question : comment disposer les 120 microphones de l'antenne ? De façon un peu contre-intuitive, les algorithmes





les conférences

au Palais de la découverte

Entrée libre dans la limite des places disponibles

La lumière dévoile l'Univers

> les mercredis à 19h

Cycle de 4 conférences

6 mai **La première lueur de l'Univers**
avec Karim Benabed

20 mai **Aux sources de la lumière**
avec David Elbaz

27 mai **La tapisserie lumineuse**
avec Valérie de Lapparent

3 juin **Les noirceurs de l'Univers**
avec Daniel Kunth

programme complet sur
palais-decouverte.fr

Avec soutien de



