POUR LA SCIENCE
Édition française de Scientific American
HORS-SÉRIE

M 01930 - 100H - F: 7,90 € - RD

AOÛT-SEPTEMBRE 2018
N° 100

numéro 100 spécial MUSIQUE

MATHS
LA MUSIQUE MISE EN ALGÈBRE

PHYSIQUE
MODÉLISER POUR MIEUX ACCORDER

PSYCHOLOGIE
LA MUSIQUE REND PLUS INTELLIGENT

GRAND TÉMOIN
ANDRÉ MANOUKIAN

GOOD VIBRATIONS

DE LA PHYSIQUE DES ONDES À LA MUSICOTHÉRAPIE

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE
BEL: 9,40 € – CAN: 13,20 CAD – DOM/S: 9,40 € – ESP: 8,95 € – GR: 8,95 € – LUX: 8,95 € – MAR: 105 MAD – TOM/A: 2400 XPF – TOM/I: 1320 XPF – PORT. CONT.: 8,90 € – CH: 17,10 CHF

Association Petits Princes 30 ans

Espace offert par le support

Grâce à l'engagement des bénévoles,
Sarah a vu son rêve se réaliser.
Pour que d'autres enfants et adolescents gravement malades puissent vivre une parenthèse enchantée dans leur combat contre la maladie,
l'Association Petits Princes a besoin de vous.

RÉALISEZ LES RÊVES DES ENFANTS GRAVEMENT MALADES.

DEVENEZ BÉNÉVOLE

01 43 35 49 00

www.petitsprinces.com

Chaque jour, un rêve d'enfant est réalisé.

POUR LA SCIENCE
HORS-SÉRIE

www.pourlascience.fr
170 bis boulevard du Montparnasse – 75014 Paris
Tél. 01 55 42 84 00

GROUPE POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin
Maquettiste: Céline Lapert

POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef: Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe
Community manager: Jonathan Morin

Conception graphique: William Londiche
Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel et Ingrid Leroy
Réviseuses: Anne-Rozenn Jouble et Maud Bruguière
Marketing & diffusion: Arthur Peys
Direction du personnel: Olivia Le Prévost
Direction financière: Cécile André
Fabrication: Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot
Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique: Hervé This

PRESSE ET COMMUNICATION
Susan Mackie
susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France
Stéphanie Jullien
stephanie.jullien@pourlascience.fr • Tél. 06 19 94 79 25

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne: http://boutique.pourlascience.fr
Courriel: pourlascience@abopress.fr
Tél.: 03 67 07 98 17
Adresse postale: Service des abonnements
Pour la Science – 19 rue de l'Industrie – BP 90053
67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an (16 numéros)
France métropolitaine: 79 euros – Europe: 95 euros
Reste du monde: 114 euros

DIFFUSION
Contact kiosques: À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet
Tél. 04 88 15 12 41
Information/modification de service/réassort:
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN
Editor in chief: Mariette DiChristina
President: Dean Sanderson
Executive Vice President: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.
© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier : Italie
Taux de fibres recyclées : 0 %
« Eutrophisation » ou « Impact sur l'eau » :
Ptot 0.008kg/tonne

Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.

PEFC 10-32-2813 / Certifié PEFC / pefc-france.org

ÉDITORIAL

LOÏC MANGIN
Rédacteur en chef adjoint

« Laissez jouer la musique »

En 1966, Brian Wilson, leader du groupe américain The Beach Boys, s'enferme avec des kilomètres de bandes enregistrées dans divers studios californiens. Il en sortira avec, selon les spécialistes, l'une des meilleures chansons pop de tous les temps: *Good Vibrations*. Elle est particulière à plus d'un titre.

D'abord, elle est construite à partir de fragments, de modules interchangeables, que l'on peut déplacer à l'envi. C'est un peu le principe de la musique contemporaine élaborée quasi mathématiquement à partir de motifs répétés, inversés, transposés…

Ensuite, Brian Wilson a utilisé pour *Good Vibrations* les sons d'un étrange instrument, une sorte de thérémine (un des plus anciens instruments de musique électronique, inventé en 1919 par le Russe Lev Termen). Ce n'était pas suffisant. Le compositeur a affirmé qu'il voulait reproduire les sons qu'il avait «dans la tête» et qu'aucun instrument ne pouvait produire. Que n'a-t-il connu les instruments virtuels depuis peu disponibles!

Enfin, pourquoi ce titre? L'idée de la chanson lui aurait été inspirée par sa mère, selon qui les chiens seraient dotés d'un sens particulier leur révélant les «mauvaises vibrations». Brian Wilson pensait quant à lui que les humains ressentent les bonnes vibrations!

Toujours est-il que le succès de la chanson a dépassé son créateur. Peu après sa sortie, il commença à souffrir d'une dépression dont il ne sortira qu'après plusieurs décennies. Les dernières techniques de musicothérapie auraient-elles pu accélérer sa guérison?

Mathématiques et musique, instruments virtuels, musique et cerveau… *Good Vibrations* réunit à elle seule plusieurs facettes de ce numéro dédié à la musique. Pourquoi la musique? Parce 25 ans et 100 numéros, ça se fête! Alors, comme le chante Barry White, *Let the music play*!

SOMMAIRE

POUR LA SCIENCE HORS-SÉRIE
N° 100
Août-septembre 2018

Good vibrations

DE LA PHYSIQUE DES ONDES À LA MUSICOTHÉRAPIE

VIBRER À L'UNISSON

Constituez votre collection de *Hors-Séries Pour la science* Tous les numéros depuis 1996

pourlascience.fr

P. 6
La musique à la portée… de tous
Toutes les notions indispensables pour apprécier ce numéro.

P. 10
Avant-propos
ANDRÉ MANOUKIAN
« La musique, dès son apparition, a été une manifestation du sacré »

© Eric Fougère / GettyImages

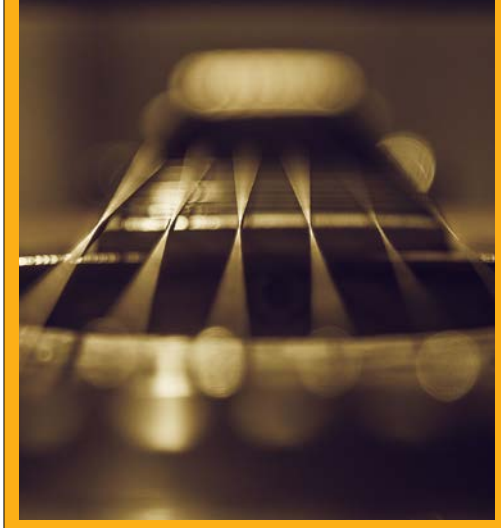
P. 16
La musique est-elle universelle ?
Barbara Tillmann
Le langage s'acquiert de façon tout aussi spontanée que l'on apprend à parler.

P. 24
Algèbre et géométrie : sont-elles inscrites dans le cerveau ?
Moreno Andreatta et Carlos Agon
Les mathématiques de la musique contemporaine seraient inhérentes à notre cerveau.

P. 32
Sur un air d'évolution
Emmanuel Bigand
La musique a une valeur adaptative : elle favorise notamment la cohésion sociale.

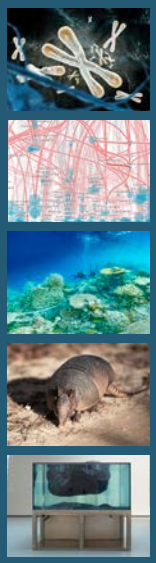
P. 40
Un anthropologue au pays de la musique
Victor A. Stoichita
Les pratiques musicales sont diverses, mais toujours liées à la pensée métaphysique.

En couverture :
Aleksei Derin / Shutterstock.com ; Pour la Science



ÉMETTRE LES BONNES VIBRATIONS

FAIRE VIBRER LA CORDE SENSIBLE



RENDEZ-VOUS

par Loïc Mangin

P. 48
L'holographie au secours des luthiers
Nancy Bertin, Laurent Daudet, Rémi Gribonval et François Ollivier
Une technique d'analyse et de visualisation des vibrations facilite la tâche des luthiers.

P. 56 Portfolio
Les trésors de la musique
Le musée de la Musique, à Paris, fête cette année ses 20 ans. Morceaux choisis.

P. 64
Des instruments de musique… virtuels
Thomas Hélie et Christophe Vergez
Quel est le secret des instruments de musique virtuels aux sonorités réalistes?

P. 72
Un son en trois dimensions
Olivier Warusfel
Essentielle aux jeux vidéo et aux home cinémas, la spatialisation du son est en plein essor.

P. 80
Dans les cordes d'une harpe
François Gautier et Jean-Loïc Le Carrou
Comment accorder une harpe, instrument complexe par excellence? Grâce à la physique.

P. 90 Extraits
La musicothérapie
Soigner grâce aux bienfaits de la musique: c'est le sujet du livre de François-Xavier Vrait.

P. 94
Quand la musique est bonne
Hervé Platel et Sébastien Bohler
Personne – ou presque – n'est insensible au pouvoir de la musique. Pourquoi?

P. 100 Entretien
« La beauté est dans les qualités sensibles, mais elle ne fait pas partie des qualités sensibles elles-mêmes »
Francis Wolff

P. 104
Oui, la musique rend intelligent
Nicolas Guéguen
L'apprentissage de la musique demande des efforts, mais entraîne une pluie de retombées positives.

P. 108
À lire en plus

P. 110
Rebondissements
L'immortalité n'est pas éternelle • La matière noire a refroidi l'ambiance • Plus fort qu'un dermatologue • L'oiseau et l'enfant… momifiés •

P. 114
Données à voir
Le secret de l'association des bons ingrédients en cuisine.

P. 116
Les incontournables
Des livres, des expositions, des sites internet, des vidéos, des podcasts… à ne pas manquer.

P. 118
Spécimen
Contre la lèpre, tatou compris?

P. 120
Art & Science
D'une explosion à l'autre

La musique à la portée... de tous

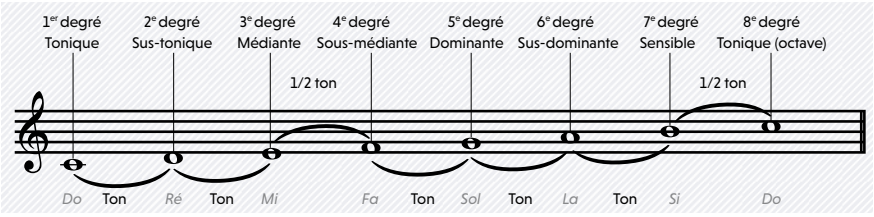
Pour qui n'est pas musicien dans l'âme, les notions utilisées pour parcourir le monde des notes sont parfois complexes. Quelques explications s'imposent pour s'y retrouver, et apprécier pleinement ce numéro.

NOTE

Une note correspond à la hauteur d'un son, c'est-à-dire sa fréquence (le nombre de vibrations par seconde, exprimé en hertz, ou Hz). L'oreille humaine perçoit entre 20 et 20 000 hertz. Le *la* du diapason a une fréquence de 440 hertz.
Dans la musique occidentale, les principales notes ont pour noms : *do*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la* et *si (voir figure ci-dessous)*.

OCTAVE

Elle correspond à l'intervalle entre deux notes dont la fréquence de l'une est le double de l'autre. Ces notes portent le même nom, mais sont distinguées par un numéro d'octave. Pour repérer deux notes de même nom dans deux octaves différentes, on numérote les octaves. Ainsi, le *la* à 440 hertz est le *la* 3. Le *la* 2 est à 220 hertz, le *la* 1 à 110 hertz, le *la* 4 à 880...



ALTÉRATION

Une altération monte ou baisse la hauteur d'une note. Le dièse (noté #) élève la note d'un demi-ton. Le bémol (noté ♭) abaisse la note d'un demi-ton.

NOM DES NOTES

Pour désigner les notes, le moine Guido d'Arezzo, en 1028, s'est inspiré de *L'Hymne à saint Jean-Baptiste*, un chant religieux latin attribué au moine et érudit Paul Diacre :

Ut queant laxis
Resonare fibris
Mira gestorum
Famuli tuorum
Solve polluti
Labii reatum
Sancte **I**ohannes

Traduction : *Pour que puissent / Résonner les cordes / Détendues de nos lèvres / Les merveilles de tes actions / Enlève le péché / De ton impur serviteur / Ô saint Jean.*
L'*ut* a ensuite été remplacé par le *do*, plus facile à chanter.

Dans d'autres pays, on utilise plus simplement des lettres. Ainsi, dans les pays anglo-saxons :

Français	do	ré	mi	fa	sol	la	si
Anglais	C	D	E	F	G	A	B

© Vladimir Serov / GettyImages

GAMME

Une gamme est une succession de notes disposées dans l'ordre des fréquences croissantes (ou décroissantes). Les notes d'une gamme sont assimilables à une palette de couleurs qu'un peintre (musicien) aurait à sa disposition pour réaliser ses tableaux. Changer de gamme, c'est changer le choix de ces couleurs. Dans les gammes majeures, les écarts entre les notes suivent cet ordonnancement : 1 ton, 1 ton, ½ ton, 1 ton, 1 ton, 1 ton, ½ ton. La figure page ci-contre montre une gamme en *do* majeur.
Dans les gammes mineures, les écarts entre les notes sont successivement : 1 ton, ½ ton, 1 ton, 1 ton, ½ ton, 1 ton, 1 ton.

INTERVALLE

L'intervalle entre deux notes s'exprime en tons et en demi-tons. Une octave compte six tons par exemple.

GAMME DIATONIQUE

Elle utilise sept notes (*do*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*) de noms différents, la huitième étant la répétition de la première à l'octave supérieure (*do* ici). Les notes – ou degrés – de la gamme diatonique ne sont pas séparées d'un même intervalle *(voir figure page ci-contre)*.

DEGRÉ DE LA GAMME

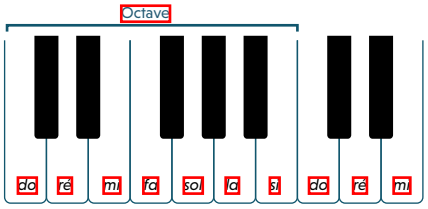
Chaque son peut être la première note d'une gamme. Chaque degré, quelle que soit la note qui le représente, a un nom qui caractérise la position qu'il occupe dans la gamme. À cette position correspond une fonction. Ainsi, le premier degré se nomme tonique, le deuxième sus-tonique, le troisième médiante, le quatrième sous-dominante, le cinquième dominante, le sixième sus-dominante, le septième sensible et le huitième octave ou tonique *(voir figure page ci-contre)*.

GAMME CHROMATIQUE

Toutes les notes de cette gamme sont séparées par des demi-tons pas tout à fait égaux (par construction mathématique).

GAMME TEMPÉRÉE

Elle divise l'octave en douze intervalles (ou demi-tons) égaux, à la différence des autres gammes. Elle correspond aux douze notes qui divisent l'octave sur le clavier d'un piano : pour la gamme de *do* par exemple, les sept touches blanches de *do* à *si* (les notes de la gamme diatonique) et les cinq touches noires intercalées *(leurs altérations, ci-dessous)*.



ACCORDS ET ENSEMBLES DE NOTES

Un tétracorde est une succession de quatre sons (*do*, *ré*, *mi*, *fa*). Par extension, un hexacorde est une succession de six sons. Un accord est un ensemble de sons entendus simultanément, par exemple (*do*, *mi*, *sol*). Un accord peut subir ce que l'on nomme des renversements. Ainsi, dans le premier renversement de (*do*, *mi*, *sol*), *mi* devient la note la plus basse (*mi*, *sol*, *do*), et dans le deuxième renversement, c'est le *sol* (*sol*, *do*, *mi*).

MODE

Le mode indique une disposition particulière des intervalles de la gamme. La musique tonale s'organise en deux modes, le majeur et le mineur. La gamme de *do* majeur *(voir la figure page 6)* est le modèle des gammes majeures, la gamme de *la* mineur, celui des gammes mineures.

RAPPORTS ET PYTHAGORE

Les notes séparées d'une octave sont dans un rapport de fréquence 2/1, par exemple *la* 3 à 440 hertz et *la* 2 à 220 hertz. On peut imaginer d'autres rapports, ce que fit Pythagore pour concevoir sa gamme. Ainsi la quinte correspond-elle au rapport 3/2 et la quarte au rapport 4/3. À chaque fois, on prend soin de « normaliser », c'est-à-dire de ramener la note dans la gamme de départ.
En itérant le principe de la quinte (multiplier par 3/2), Pythagore construit la gamme diatonique à sept notes *(ci-dessous)* : 1 (l'octave), 3/2 (la quinte), 9/8 (la seconde, définie par $(3/2)^2 = 9/4$, que l'on divise par 2, pour normaliser, soit 9/8)... On constate que la quinte correspond à la cinquième note, d'où son nom. Il aurait pu continuer, mais il s'arrête à sept, probablement car ce nombre est celui des astres connus à son époque. De même, la septième itération de la quinte permet, à un très faible écart près, de boucler la boucle.
Quant aux écarts *(en rouge)*, on constate qu'il n'y a que deux valeurs : 9/8 et 256/243. La première définit le ton, la seconde, le demi-ton de la gamme diatonique.

RYTHME

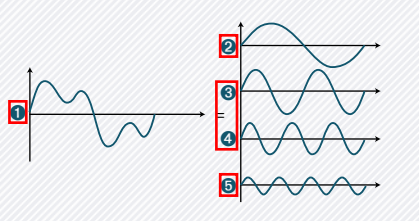
La mesure, le rythme et le mouvement fixent le déroulement temporel d'un morceau. La mesure est la division en parties égales d'un morceau de musique. Une mesure contient plusieurs notes et des silences ; elle est délimitée par des barres de mesure. Une mesure se subdivise généralement en deux, trois ou quatre temps. Tous les temps d'une mesure n'ont pas une égale importance. Dans une mesure à deux temps, le premier est un temps fort, le second un temps faible. Dans une mesure à trois temps, le premier est fort, le deuxième et le troisième sont faibles. Dans une mesure à quatre temps, le premier et le troisième sont forts, les deux autres faibles. Le rythme est caractérisé par les durées des notes et des silences dans une phrase musicale. La multitude des combinaisons possibles est une des principales richesses de la musique. Le mouvement est la vitesse à laquelle on doit interpréter un morceau : c'est le tempo.

TEMPO OU INTERPRÉTATION

Outre sa terminologie technique, l'écriture musicale utilise aussi des expressions spécifiques indiquant aux musiciens comment interpréter l'œuvre. Les termes, généralement indiqués en italien sur les partitions, sont expressifs : *affettuoso*, *agitato*, *con anima*, *con espressione*, *con spirito* (avec esprit), *grazioso*, *maestoso* (majestueux), *moderato*, *vivace*, voire *vivacissimo*. Ces termes évoquent les émotions que le musicien doit transmettre à l'auditeur. Les plus connus sont : *andante*, *andantino*, *allegro*, *allegreto* et *moderato*.

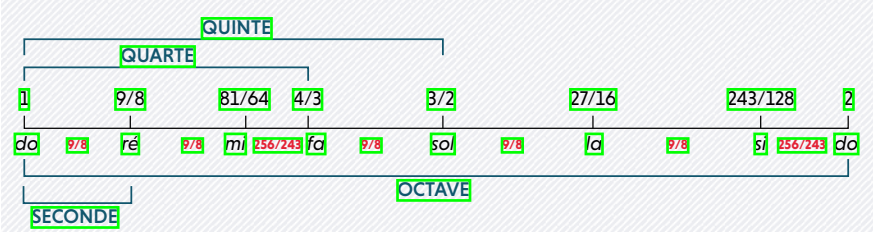
HARMONIQUE

Le son musical *(1, ci-dessous)* est la superposition d'un son fondamental *(2)* et d'harmoniques *(de 3 à 5)* dont les fréquences sont des multiples de la fréquence fondamentale (double, triple...). Plus un son est riche en harmoniques, plus il sera riche à l'oreille.



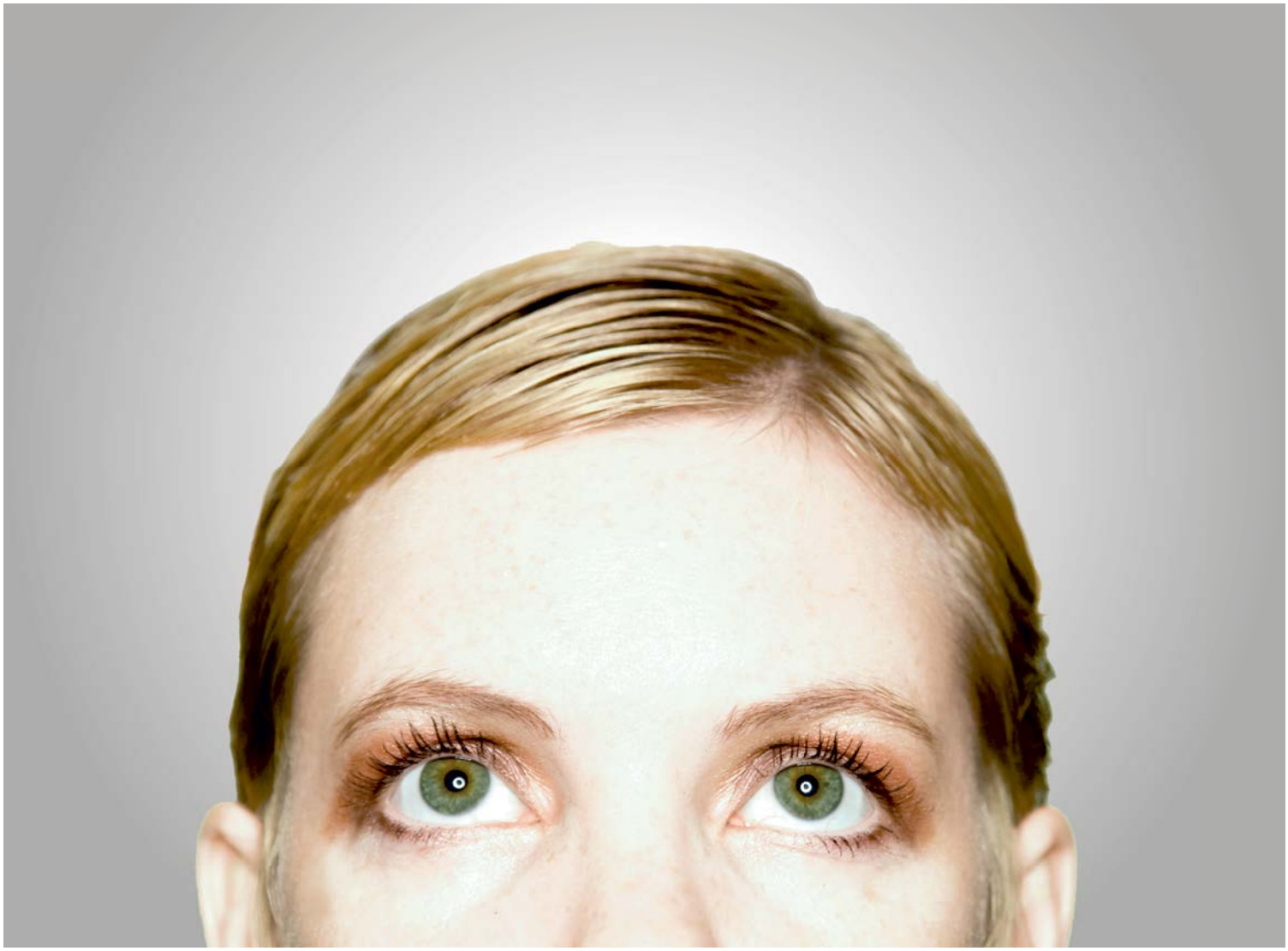
TIMBRE

Un son a quatre qualités : la durée, la hauteur (ou fréquence), l'intensité et le timbre.
Le timbre représente un son complexe formé de plusieurs fréquences issues de la fondamentale (ses harmoniques). Il permet d'identifier un son d'une façon unique. Deux sons produits avec deux instruments peuvent avoir la même fréquence fondamentale et la même intensité, mais jamais avoir le même timbre. C'est grâce au timbre qu'on distingue une même note jouée au piano ou au violon, mais aussi qu'on reconnaît la voix d'une personne.



AcademiaNet

La base de données qui rassemble toutes les femmes scientifiques de renommée internationale



AcademiaNet offre un service unique aux instituts de recherche, aux journalistes et aux organisateurs de conférences qui recherchent des femmes d'exception dont l'expérience et les capacités de management complètent les compétences et la culture scientifique.

AcademiaNet, base de données regroupant toutes les femmes scientifiques d'exception, offre:

:: Le profil des femmes scientifiques les plus qualifiées dans chaque discipline – et distinguées par des organisations de scientifiques ou des associations d'industriels renommées

:: Des moteurs de recherche adaptés à des requêtes par discipline ou par domaine d'expertise

:: Des reportages réguliers sur le thème »Women in Science«

Robert Bosch Stiftung

Spektrum DER WISSENSCHAFT

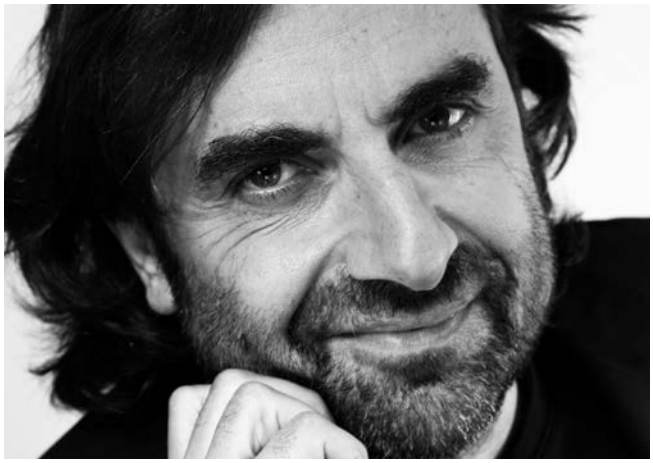
nature

POUR LA SCIENCE

Une initiative de la Fondation Robert Bosch en association avec Spektrum der Wissenschaft et Nature Publishing Group

www.academia-net.org

ANDRÉ MANOUKIAN



« La musique, dès son apparition, a été une manifestation du sacré chez les êtres humains »

Quelles relations la musique entretient-elle avec la science ?

André Manoukian : La musique, c'est d'abord des mathématiques. C'est d'ailleurs Pythagore, un mathématicien, qui a inventé la gamme, même s'il a sans doute été inspiré par ce qu'il a vu en Égypte, où il a enseigné.

Les histoires divergent sur les détails, mais disons qu'il prend une corde et la fait vibrer. En la divisant en deux, il s'aperçoit qu'elle vibre à l'octave (la fréquence est un multiple, la note est identique). En pinçant les deux tiers de la corde, il obtient la quinte, avec les trois quarts, la quarte… Avec ces proportions, il construit les quatre notes essentielles, c'est-à-dire *do*, *do* (à l'octave), *sol* (la quinte) et *fa* (la quarte). Ces notes constituent ce que l'on nomme la cadence parfaite.

Selon le philosophe grec, le cosmos et la création du monde étaient fondés sur la *Tetraktys* (du grec *Tetra*, pour *quatre*). Au commencement est le *un* qui se divise en *deux*. De ce *deux*, symbole de l'antagonisme, de la sexualité, va naître le *trois*, le tout se mouvant dans le *quatre*, soit le nombre d'éléments. Or 1, 2, 3 et 4 forment un nombre pyramidal, un nouveau *un*. À ce scénario, il associe les notes *fa*, *sol* et *do* qui se trouvent aussi être celles des accords du blues. Moralité, Dieu est un joueur de blues, c'est Pythagore qui le dit.

De là, il établit la gamme ?

André Manoukian : Oui, en renouvelant le procédé de la quinte pour obtenir les notes : *do*, *sol*, *ré*, *la*, *mi*, *si*, *fa* dièse, *do* dièse, *sol* dièse, *ré* dièse, *la* dièse et *mi* bémol. La suivante est à nouveau un *do*, mais avec un léger décalage, repéré par Jean-Sébastien Bach, par rapport à celui du départ. On supprime cet écart en baissant artificiellement un peu les fréquences pour obtenir des notes justes et identiques, quelle que soit l'octave. C'est la gamme dite tempérée, où toutes les notes

BIO EXPRESS

9 AVRIL 1957
Naissance à Lyon.

1977
Cours de jazz au Berklee College of Music, à Boston.

2010
Création du festival de jazz Cosmojazz, à Chamonix.

2017
Sortie de son dernier album «Apatride», chez Mad Chaman.

© Eric Fougere / ©HettyImages

sont séparées par un demi-ton. À partir de cette gamme, on dérivera la gamme diatonique utilisée dans la musique occidentale : *do*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*. Là, les écarts sont inégaux (*voir les Repères, page 6*).

Dans ce jeu de proportions se nouent des rapports de force, car dans une note jouée, beaucoup d'autres sont sous-entendues : ce sont des harmoniques, c'est-à-dire des notes dont la fréquence est un multiple (ou un sous-multiple) de la fréquence fondamentale. Ainsi, quand on joue un *do*, on émet aussi un *do* à l'octave, un *sol*, un autre *do*, un *mi*... On retrouve les notes de ce que l'on nomme l'accord parfait du blues (*do, mi, sol*) : elles sonnent dans une seule note, elles sont aimantées. Ce n'est pas toujours le cas. Entre les notes, tout n'est qu'attraction et répulsion.

Une anecdote l'illustre. Mozart, à 3 ans, est interdit de clavecin, un instrument très difficile à accorder. Pourtant, un jour, son père le découvre les doigts sur le clavier. Il va pour le châtier quand son fils lui dit qu'il cherche « les notes qui s'aiment ». Résultat : pas de punition !

Les mathématiques ne sont-elles pas aussi très présentes dans la musique contemporaine où les œuvres sont construites sur des jeux de symétries ?

André Manoukian : C'est vrai, mais Bach l'avait déjà fait sans que l'on parle pour autant de musique sérielle ou dodécaphonique. Il développait des petites cellules mélodiques, un petit groupe de notes, grâce à l'équivalent d'algorithmes. Il en faisait des transpositions, des inversions, des symétries miroirs afin d'explorer toutes les combinaisons possibles... C'est le principe des Lego en musique.

Dans son *Art de la fugue*, la dernière pièce proposée est inachevée. Comment l'expliquer ? Ce n'est pas faute de temps, car il ne mourra que dix ans plus tard. Et on ne peut pas non plus le soupçonner de fainéantise. Plusieurs spécialistes s'accordent aujourd'hui à dire que l'ouvrage détaille des recettes à appliquer et laisse la dernière fugue incomplète pour que le lecteur puisse mettre en pratique ce qu'il vient de lire.

Le plus bel exemple serait un thème que lui soumet le roi de Prusse Frédéric II. Un thème banal dont Bach va pourtant faire un chef-d'œuvre : *L'Offrande musicale*. L'*Art de la fugue* est une sorte d'intelligence artificielle qui fait de Bach un « compositeur augmenté » par la puissance de ses algorithmes !

On retrouve cette idée avec les jazzmen habitués à improviser et qui, pour ce faire, ont intégré de nombreux algorithmes. De fait, leur cerveau présente des similitudes avec celui des mathématiciens. Ces musiciens sont obligés d'anticiper. C'est ce qu'a mis en évidence une équipe de l'institut Max Planck, à Leipzig, en Allemagne, en comparant le cerveau de pianistes de jazz à celui de pianistes classiques. Les premiers ont mieux réagi, et plus rapidement, face à l'inattendu (des accords bancals) que les seconds. Le musicien classique est contraint par la technique, la perfection du geste, la partition, tandis que le jazzman est toujours aux aguets.

J'en profite pour rappeler qu'en Occident, la musique a subi un préjudice énorme le jour où, à la fin du XIX^e^ siècle, on a cessé d'apprendre l'improvisation dans les écoles de musique et quand celles-ci sont devenues des *conservatoires*. Ce mot dit tout : on met la musique en conserve ! La musique se transforme en patrimoine, le compositeur s'est mué en patron et les musiciens en exécutants.

Tous les musiciens baroques improvisaient (on le voit dans le film *Tous les matins du monde*), de même qu'ensuite Mozart, Beethoven... Chopin était obligé de payer un auxiliaire qui notait tout ce que le pianiste jouait. Puis, on a décidé de ne plus enseigner l'improvisation, sauf à l'orgue, car à l'église la durée des messes était incertaine. La situation a changé il y a une vingtaine d'années, quand justement le jazz a été admis dans les conservatoires.

Changeons de science, et intéressons-nous à l'anthropologie. Que vous évoque l'idée selon laquelle la musique aurait procuré un avantage adaptatif à nos lointains ancêtres ?

André Manoukian : Mieux qu'un avantage adaptatif, la musique reliait les humains aux forces incontrôlées de la nature et constituait un médiateur avec tous les dangers qui les guettaient, qu'ils tombent du ciel ou qu'ils les lacèrent de leurs griffes et crocs aiguisés.

« Moralité, Dieu est un joueur de blues, c'est Pythagore qui le dit ! »

Le mathématicien et musicien d'origine russe Iégor Reznikoff, également chanteur, s'est rendu compte que toutes les églises étaient acoustiquement travaillées. Par exemple, des ouvertures sont spécialement ménagées pour évacuer les fréquences qui créent des résonances désagréables. Le préhistorien Michel Dauvois l'entend et lui propose durant l'hiver 1983 de tester la grotte du Portel, dans l'Ariège. Dans cette caverne, il s'aperçoit que les peintures rupestres sont précisément situées à des endroits qui résonnent. Plus encore, les parois où sont représentés des mammouths renvoient les sons graves, les zones à oiseaux résonnant de façon plus aiguë.

Dans une grotte où les torches étaient rares, le son avait énormément d'importance pour se guider, pour alerter... Selon Iégor Reznikoff, les images d'animaux étaient pour les hommes préhistoriques une façon de communiquer avec eux. Le chant et la musique se superposaient aux représentations qui, seules, nous restent aujourd'hui.

Qu'en est-il des premiers instruments ?

André Manoukian : Les plus anciens instruments de musique connus datent d'environ 40000 ans. Inutile de dire qu'il y en avait bien avant. Il y avait des flûtes taillées dans des os de vautour, ainsi que des rhombes. Ces bouts d'os oblongs étaient fixés à l'extrémité d'une corde que l'on faisait tourner à la façon d'une fronde. Le bruit, une sorte de vrombissement, fonctionnait vraisemblablement comme un appeau pour attirer les animaux, ou au moins pour communiquer avec eux. Outre les flûtes, on a retrouvé des sifflets, par exemple des phalanges de renne trouées.

Étaient-ce des instruments, ou simplement les traces de dents ?

André Manoukian : L'un n'empêche pas l'autre. Les loups chassaient les grands herbivores et leur mordaient les >

membres, ce qui peut expliquer les perforations. Cependant, les humains qui trouvaient ces os ont pu souffler dedans et découvrir leurs propriétés sonores. Ensuite, il ne leur restait plus qu'à les fabriquer eux-mêmes.

Revenons sur le rôle de médiateur de la musique entre nos ancêtres et les forces qui les entouraient.

André Manoukian: Le chamane était probablement celui qui savait danser avec les esprits, jouer de la musique... Son rôle d'intercesseur consistait à faire venir la pluie, à attirer la clémence sur la tribu...

Dans certaines populations, aujourd'hui encore, seul le sorcier a le droit d'utiliser un instrument de musique. Pour les autres, l'objet est tabou, car il sert justement à entrer en contact avec les forces supérieures. Je pense donc que la musique, dès son apparition, a été une manifestation du sacré chez les êtres humains.

La musique serait donc liée à la naissance des religions?

André Manoukian: Je pense que la musique est l'instrument de propagation d'une religion au sens étymologique du terme, le latin *religere* signifiant *relier les hommes*. Une assemblée qui vibre devant un musicien, quand elle est à l'écoute, se met tout d'un coup à l'unisson des sentiments. De fait, quand on joue devant une foule, on n'a pas le sentiment de jouer devant une multitude d'individus, mais plutôt devant un seul être composé de nombreuses personnes.

Martin Luther, le père du protestantisme ne disait pas autre chose: «C'est par la musique que je vais répandre ma religion, c'est en chantant.» Jean-Sébastien Bach, protestant lui-même, est le fruit de cette déclaration. La suite est intéressante. Les Africains christianisés par des protestants et réduits à l'esclavage donneront naissance aux negro spirituals puis au gospel. Ceux convertis par des catholiques produiront la musique qui accompagne le culte des Orixas, au Brésil, et celui de la Santeria, à Cuba. Pourtant, tous venaient de la même région, celle des Yorubas, au Nigeria. Dans les deux cas, les religions des chrétiens ont été mêlées aux croyances africaines, mais les musiques qui en sont sorties sont très différentes.

Que pensez-vous de ces physiciens qui aident à la lutherie, par exemple en truffant de capteurs les instruments?

André Manoukian: C'est super, mais ils n'ont rien inventé. Les Chinois le font depuis longtemps, on en trouve la preuve... en Écosse, dans la chapelle de Rosslyn, dans le village de Roslin, au sud d'Édimbourg. Construite en 1480, elle recèle bien des mystères ouverts à toutes les interprétations plus ou moins farfelues mettant en scène les templiers, le Graal... Sur les arches, 213 cubes en pierre, protubérants, sont sculptés des figures géométriques, des carrés, des losanges... qui ont longtemps intrigué.

L'énigme aurait été résolue il y a une dizaine d'années par le musicien Thomas Mitchell. Il a proposé de voir dans ces motifs des représentations des figures de Chladni, obtenues lorsque l'on fait vibrer une tôle carrée ou une peau tendue recouverte de sable. Chaque fréquence de vibration correspond à une note et une forme uniques. Comment ces figures découvertes à la fin du XVIII[e] siècle ont-elles pu être représentées 300 ans plus tôt?

L'un des architectes écossais faisait du commerce avec la Chine où il se rendait régulièrement. Or dans ce pays, on fabrique des gongs depuis des millénaires. Et l'un des moyens pour l'artisan de tester le son de son instrument était justement de mettre du sable dessus et de le faire vibrer. Il pouvait ainsi affiner son travail et améliorer le gong. Cette technique empirique s'est retrouvée dans une chapelle à des milliers de kilomètres de l'Empire du milieu.

Passons de la physique à l'informatique avec les instruments virtuels. Quel sens donnez-vous aux tentatives de reproduction d'un piano par exemple?

André Manoukian: Je reprendrais la réponse de Gilles Deleuze quand on lui demandait ce qu'il regardait à la télévision. Selon lui, le petit écran n'était conçu que pour diffuser des objets de télévision. Les émissions littéraires, le théâtre, le cinéma... n'y avaient pas leur place. Aussi, à son époque, seul *Tournez manège* trouvait grâce à ses yeux...

C'est la même chose avec la musique. Pourquoi vouloir reproduire une trompette? Pourquoi essayer de refaire laborieusement et artificiellement un solo de trompette accessible à n'importe quel trompettiste en cinq minutes? En revanche, fabriquer des sons électroacoustiques qu'aucun instrument réel ne peut émettre présente un réel intérêt.

C'était l'un des objectifs affichés de Pierre Schaeffer lorsqu'il créa dans les années 1950 le Groupe de recherches musicales, au départ dans les services de Radiodiffusion française et aujourd'hui intégré à l'INA. Auparavant, on peut signaler Maurice Martenot qui, dès les années 1920, inventa l'un des premiers instruments de musique électronique (avec le thérémine russe), les ondes Martenot.

Avec eux, tout d'un coup, le public entendait des sons qui n'existaient nulle part ailleurs dans la nature. Il découvrait des objets sonores relevant d'un vrai processus de création. D'ailleurs, ce courant conduira à la naissance de la musique dite concrète. Les musiciens d'alors s'interrogeaient. Ils pensaient être allés au bout de l'harmonie et de la tonalité.

Une des réactions fut le dodécaphonisme et la musique sérielle. Une autre consista à rechercher de nouveaux sons et à explorer un monde vierge fait de matières sonores inédites.

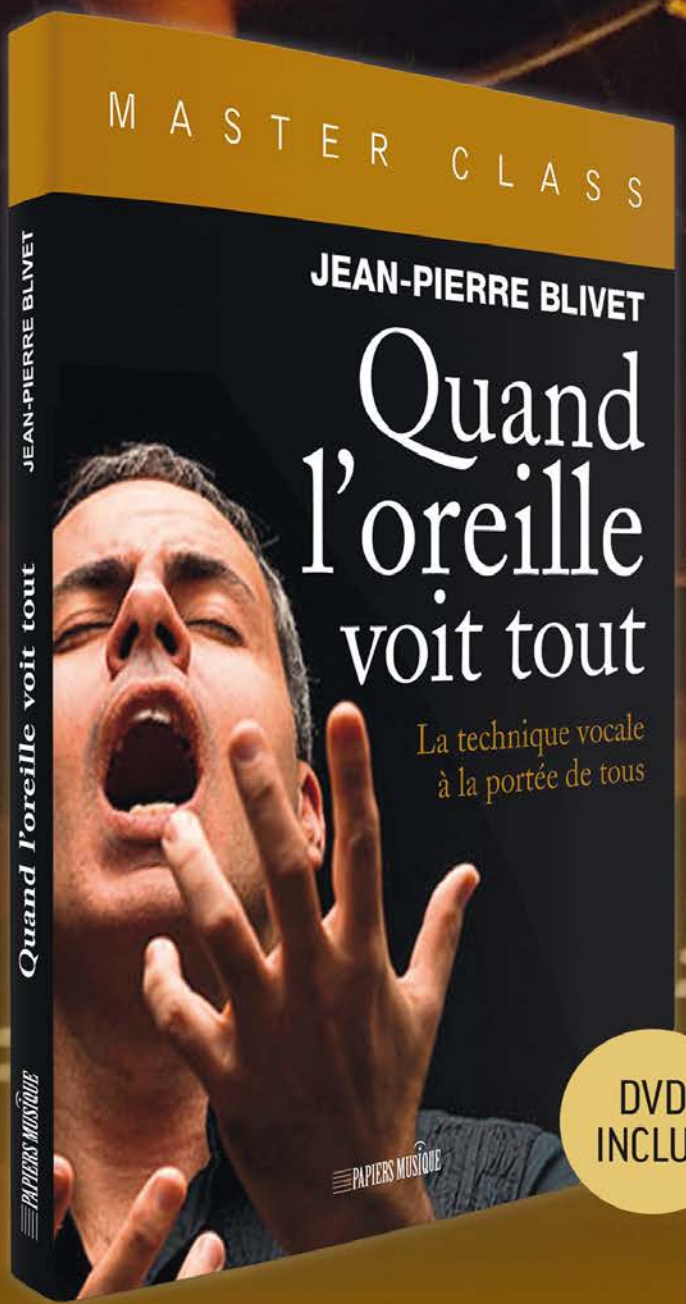
Mais beaucoup de choses sont un éternellement recommencement. Ainsi, le principe du *loop* (un motif musical répété en boucle) redécouvert par les rappeurs et l'électro existe dans des traditions millénaires: la répétition rythmique est à la base de la transe des soufis, des gnaouas... Je pourrais conclure en disant que la musique, c'est la transe et la science réunies! ■

« Fabriquer des sons électroacoustiques qu'aucun instrument réel ne peut émettre a un réel intérêt »

PROPOS RECUEILLIS PAR LOÏC MANGIN

La technique vocale à la portée de tous

Par Jean-Pierre Blivet,
professeur de grands artistes
lyriques tels que
Nathalie Dessay, Laurent Naouri



www.papiersmusique.fr

PAPIERS MUSIQUE
Éveiller, partager, transmettre

VIBRER À L'UNISSON

Tous les êtres humains sont sensibles à la musique, et ce dès le plus le jeune âge. Cette universalité plongerait-elle ses racines dans notre passé ? En d'autres termes, a-t-elle procuré à nos ancêtres un avantage adaptatif ? C'est probable. La musique aurait notamment favorisé la cohésion sociale. En tout cas, elle a laissé sa marque dans notre cerveau, où elle disposerait de réseaux dédiés. Sans compter que notre cortex serait équipé pour comprendre les structures abstraites de la musique contemporaine. Mais au fait, qu'est-ce que l'on entend par musique ? Les anthropologues en débattent…

© Arthimedes / shutterstock.com

L'ESSENTIEL

- La musique est-elle l'apanage des êtres humains ? Si c'est le cas, on doit pouvoir identifier des invariants musicaux, c'est-à-dire des structures musicales communes à presque toutes les cultures.
- De fait, dans les structures musicales, on repère des régularités communes à toutes les cultures du monde.
- On découvre d'autres universaux en étudiant les bébés. Ainsi, l'environnement musical dans lequel les enfants grandissent leur permet d'acquérir des connaissances implicites sur la musique.
- Certains réseaux neuronaux seraient communs à la perception de la musique et à celle du langage.

L'AUTEURE

BARBARA TILLMANN mène ses recherches au laboratoire Neurosciences sensorielles, comportement, cognition, CNRS-université Claude-Bernard, à Lyon.

La musique est-elle universelle ?

Quelle que soit notre culture, le langage de la musique est universel et on l'acquiert de façon tout aussi spontanée que l'on apprend à parler.

© Max Gribocdov / shutterstock.com

Depuis combien de temps les humains jouent-ils de la musique ? Les plus anciens instruments avérés sont des flûtes découvertes dans la région du Jura souabe en Allemagne, sur les sites de Hohle Fels, Vogelherd et Geissenklösterle. Datées d'environ 40 000 ans, pendant l'Aurignacien, elles ont été taillées le plus souvent dans des os d'oiseaux (vautour, cygne…). Une flûte plus ancienne encore, mise au jour en Slovénie, est attribuée aux Néandertaliens, mais l'interprétation fait débat, certains ne voyant dans les trous de l'os que des traces de dents.

Quoi qu'il en soit de l'origine, la pratique de la musique a accompagné la diversification de l'humanité et, aujourd'hui, toutes les cultures produisent de la musique et y sont sensibles. La musique serait-elle donc l'apanage des humains ? À l'instar du langage, serait-elle un caractère inné et universel ? Pour répondre, nous devons traquer les possibles traits communs aux différentes musiques du monde – des universaux musicaux – et rechercher comment les auditeurs perçoivent ces « invariants » musicaux.

UNE GAMME, DES GAMMES

La première étape de cette quête consiste à rappeler brièvement les « fondamentaux » de la construction des musiques du monde. Commençons avec la musique occidentale. Cette musique, dite tonale, repose sur les douze notes de la gamme chromatique qui couvrent une octave.

Les notes de la gamme se répètent d'une octave à la suivante, du grave à l'aigu. Les hauteurs des notes – leurs fréquences – sont fixées. Parmi les douze notes, des sous-ensembles de sept notes définissent des gammes dites diatoniques. Par exemple, pour la gamme de *do majeur*, les sept notes sont *do*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*. Les deux notes les plus importantes de cette gamme sont le *do* et le *sol*, la première étant la tonique, la seconde la dominante. Le plus souvent, le *do* commence et finit la mélodie. Le choix de certaines combinaisons de notes et la séparation des notes en octave refléteraient des traits « naturels » respectant les lois de l'acoustique, d'une part, et celles de la physiologie du système auditif humain, d'autre part ; ils créeraient une bonne consonance acoustique.

Toutefois, cette organisation de gamme n'est pas universelle. Par exemple, dans la musique arabe ou dans la musique gamelan de Bali et Java, les types de gammes diffèrent ; dans la gamme orientale, on compte vingt-quatre notes organisées en différents sous-ensembles de sept notes. De plus, à Bali par exemple, la façon dont les notes sont accordées change selon les orchestres, alors qu'en musique occidentale, tous les orchestres s'accordent sur une même note (le *la* dont la fréquence est égale à 440 hertz). Si la construction des gammes varie selon les pays, la musique est-elle vraiment un langage universel ?

La musique est une information acoustique complexe organisée et structurée dans le temps. Les deux principales caractéristiques de cette organisation sont la hauteur des notes et la dimension temporelle – la durée des sons et leur distribution dans le temps.

Concernant la hauteur des sons, on observe certaines régularités musicales quel que soit le système musical. D'abord, nous l'avons vu, les notes sont organisées en gammes qui forment une progression discrète de hauteurs : l'ensemble des hauteurs n'est pas continu. Par ailleurs, un nombre réduit de notes (de cinq à sept) est choisi pour les sous-ensembles de la gamme (*voir l'encadré page ci-contre*). Les notes se répètent au fil des octaves selon une séquence cyclique du grave à l'aigu.

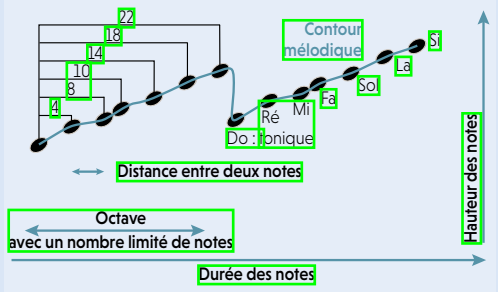
En outre, les notes sont séparées par des intervalles inégaux. Ainsi, en musique occidentale tonale, les écarts en demi-tons entre les notes de la gamme diatonique, par exemple la gamme de *do majeur*, exprimés par rapport à la note initiale, sont : 2, 2, 1, 2, 2, 2 (la deuxième est séparée de la première par deux demi-tons, la troisième de la deuxième par deux demi-tons, la quatrième de la troisièmes par un demi-tons…). En transformant en quarts de tons le patron de la gamme de *do majeur* en demi-tons, on obtient 0-4-8-10-14-18-22-24, on peut le comparer à celui de la gamme orientale nommée *rast* : 0-4-7-10-14-18-21-24.

Qui plus est, à l'instar de la musique occidentale tonale, toutes les notes n'ont pas la même

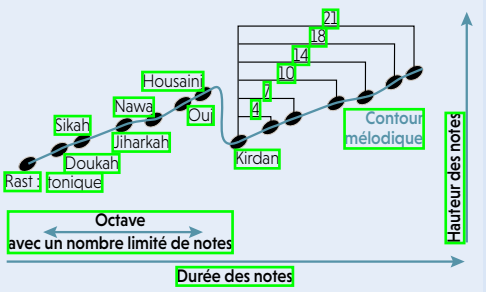
LES BÉBÉS SONT « UNIVERSALISTES » : ILS PERÇOIVENT LA MUSIQUE DE TOUTES LES CULTURES DU MONDE

LES POINTS COMMUNS DES MUSIQUES DU MONDE

Certaines structures musicales sont présentes quelle que soit la culture ; on parle d'invariants musicaux. Il s'agit notamment de la distance variable entre les notes, du nombre de notes par octave qui est compris entre cinq et sept, de l'organisation des hauteurs des notes qui se fait par niveaux discrets. Ces invariants et d'autres existent dans toutes les musiques du monde. En revanche, le nombre de notes peut changer et la façon dont elles sont accordées dépend de la culture. Nous prenons en exemple la gamme de *do majeur* de la musique occidentale tonale et celle nommée *rast* de la musique orientale pour présenter ces régularités musicales (sachant que certaines musiques ne s'écrivent pas sur des portées et, par conséquent, sont plus difficiles à présenter). Les invariants musicaux sont écrits en caractères gras.



UNE GAMME OCCIDENTALE
Cette gamme de *do majeur* possède sept notes par octave : *do*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*. La distance entre les notes, exprimée en quarts de tons par rapport à la première note, correspond au patron 0-4-8-10-14-18-22-24.



UNE GAMME ORIENTALE
Cette gamme *rast* a aussi sept notes par octave : *rast*, *doukah*, *sikah*, *jiharkah*, *nawa*, *housaini*, *ouj*, la première note de l'octave suivante se nommant *kirdan*. Le patron, en quarts de tons, est cette fois : 0-4-7-10-14-18-21-24.

D'AUTRES INVARIANTS

La fonction d'une note change selon le contexte ; ici le *do* est la tonique, la note la plus importante de la gamme, le *sol* la dominante et le *si* la note la moins importante de la gamme, la sensible. La note la plus importante de la gamme orientale est *rast*.

Le contour mélodique est le patron défini par les hauteurs des notes qui montent et qui descendent.

Le rythme est la durée des notes les unes par rapport aux autres.

La mesure est la pulsation de référence de la mélodie.

Le tempo est la vitesse d'exécution d'une mélodie.

importance dans la gamme : dans la musique indienne, le bourdon joue le rôle de la tonique ; dans la musique gamelan ce rôle revient au gong. En outre, l'organisation des notes dont les hauteurs montent et descendent dessine un contour mélodique, dont l'importance se retrouve dans les musiques de toutes les cultures.

Quant à la dimension temporelle de la musique, on distingue trois caractéristiques importantes : le rythme, la mesure et le tempo. Le premier définit la durée relative des notes dans un morceau. Il varie notablement selon les pièces musicales et les cultures. La mesure, l'unité de base d'une partition, impose une pulsation régulière sur laquelle les patrons rythmiques se superposent. On en compte plusieurs types : la mesure à deux temps ou celle à trois temps – de la valse – par exemple. D'autres, plus complexes, sont des mesures à cinq ou à sept temps qui mêlent des groupements de deux et de trois temps par exemple. Enfin, le tempo représente la vitesse d'exécution d'une œuvre musicale.

Diverses structures musicales se retrouvent donc dans toutes les cultures. Pourquoi ? Certains invariants résultent vraisemblablement de la façon dont le cerveau traite les sons. La musique, comme n'importe quel son, est traitée par le cerveau qui met à profit ses propriétés d'organisation, d'apprentissage, de mémorisation et d'attention.

L'utilisation de notes de hauteurs discrètes permet de les catégoriser ; c'est une caractéristique cognitive de regrouper des événements différents dans une même catégorie selon leurs propriétés similaires. Par exemple, la perception catégorielle des sons contribue à la reconnaissance d'une mélodie même si les notes ne sont pas chantées justes.

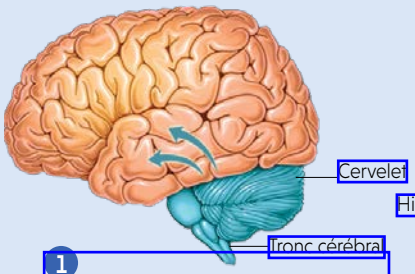
DES LIMITES COGNITIVES

De même, on distingue deux notes de hauteurs différentes (à condition qu'elles soient séparées d'une différence minimale de hauteur), mais on associe deux notes identiques séparées par une octave (elles n'ont donc pas la même fréquence). Ces deux aspects – les contraintes de perception discriminative des hauteurs et le phénomène d'équivalence d'octave – reflètent des caractéristiques du système auditif.

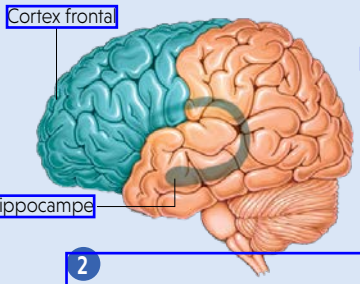
Poursuivons la recherche de liens entre musique et cerveau. C'est le cas du nombre de notes par octave. Limiter ce nombre à cinq ou sept notes (et les répéter dans les différentes >

UNE MUSIQUE DANS LA TÊTE

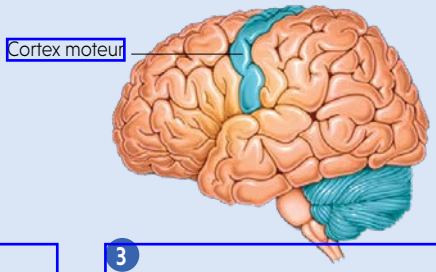
Plusieurs régions cérébrales participent à la musique. Le son est d'abord traité par les structures de l'oreille et les régions sous-corticales et corticales propres au système auditif. Puis interviennent des parties du cerveau impliquées dans la mémoire, les émotions, les mouvements ou d'autres modalités sensorielles. Certaines sont communes à la musique et au langage et d'autres seraient spécifiques à la musique.



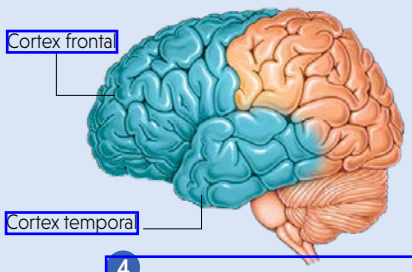
1 Écouter des sons active notamment le tronc cérébral et le cervelet. L'information se déplace ensuite vers le cortex temporal et les aires auditives primaires et secondaires.



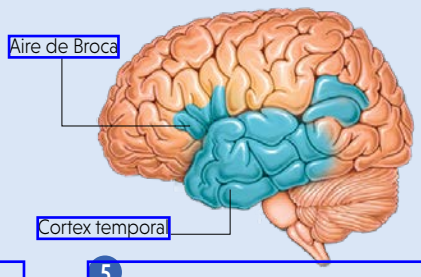
2 Écouter une musique familière active entre autres des régions impliquées dans la mémoire. Ce sont par exemple l'hippocampe et des aires du cortex frontal.



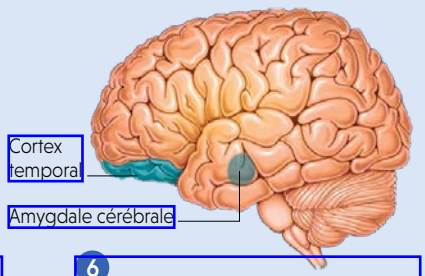
3 Battre la mesure avec le pied nécessite une synchronisation temporelle et implique le cervelet ainsi que le cortex moteur et le cortex frontal.



4 Inventer une musique, par exemple en chantant, met en jeu certaines régions situées dans le cortex frontal et le cortex temporal.



5 Écouter une musique et traiter ses structures impliquent des régions qui participent aussi au langage, telle l'aire de Broca, ainsi que d'autres régions du cortex temporal.



6 Les émotions ressenties à l'écoute musicale activent les structures participant aux émotions, tels l'amygdale cérébrale et le cortex orbitofrontal.

© Delphine Bally

octaves) diminue le nombre de données que l'auditeur doit traiter. Cela refléterait les limites cognitives de la perception catégorielle et de la mémoire à court terme qui ne pourrait stocker simultanément que quatre à neuf éléments. De plus, prendre des distances inégales entre les notes dans une gamme et leur attribuer des fonctions distinctes facilitent l'encodage et le stockage des informations mélodiques en mémoire (à court et à long termes) : les notes s'organisent autour d'un point de référence – la tonique par exemple – qui sert de point d'ancrage cognitif.

DES BÉBÉS MUSICIENS

Dans la recherche des universaux musicaux, on peut se tourner vers les nouveau-nés, ou des adultes n'ayant pas été exposés à certaines musiques, pour approcher les capacités innées. Certains travaux se sont intéressés à la mémoire et à la perception auditives des bébés, considérés comme des « universalistes », c'est-à-dire capables de percevoir la musique de toutes les cultures.

Dans des expériences dites de préférence, le bébé de 6 ou 12 mois est assis sur les genoux de sa mère et écoute des mélodies sans que la mère ne les entende. On change ensuite une caractéristique musicale de la mélodie – la distance entre les notes, le contour mélodique ou la hauteur des notes, selon ce que l'on cherche à étudier – et on regarde quelle chanson le bébé préfère écouter. Par exemple, un bébé regarde plus souvent le haut-parleur qui diffuse une mélodie familière et il ignore celui qui diffuse une musique qu'il ne reconnaît pas. On observe aussi s'il distingue des variations dans la structure musicale. Ainsi, on a montré que les bébés mémorisent mieux les notes quand elles sont séparées de distances inégales, et

qu'ils préfèrent la consonance – des sons acoustiquement cohérents ou qui sont « accordés » – à la dissonance.

Qui plus est, les bébés prêtent davantage attention aux hauteurs relatives des notes, c'est-à-dire au contour mélodique, qu'à la hauteur spécifique des différentes notes de la mélodie. Ce comportement reflète aussi une caractéristique de la perception des auditeurs adultes.

L'importance cognitive de l'information relative s'observe aussi pour la dimension temporelle de la musique : les bébés et les adultes focalisent leur attention sur l'organisation temporelle relative des notes, à savoir le rythme, plutôt que sur les durées absolues de chaque note. Ainsi, on reconnaît une mélodie grâce à son rythme, même si elle est chantée de façon différente.

En outre, on observe dans les musiques de différentes cultures que la mesure engendre un comportement de synchronisation : elle crée un cadre de référence temporelle qui permet de taper des mains ou du pied en cadence quand on écoute une mélodie à deux, trois ou quatre temps. C'est aussi grâce à elle que l'on danse sur la musique, que l'on chante et que l'on joue sur différents instruments ensemble. Cette caractéristique serait un invariant cognitif.

Pour trouver d'autres invariants cognitifs liés à la musique, on peut s'intéresser à des domaines différents. La psychologie cognitive a décrit des principes d'organisation pour la perception visuelle, notamment des règles de groupement. L'idée fondamentale est que l'observateur cherche à percevoir une « bonne forme » dans l'information fournie. Pour ce faire, il regroupe des données semblables pour y chercher une continuité.

En analysant les structures mélodiques de différents systèmes musicaux, on a constaté que des lois similaires existent pour la perception auditive, puisque l'auditeur groupe les séquences de notes selon une similarité de timbre ou d'intensité et une proximité (temporelle ou de hauteur).

En 2002, Glenn Schellenberg, de l'université de Toronto, et ses collègues ont étudié l'influence de la proximité de hauteur dans la perception des mélodies. Ils ont présenté aux participants des débuts de mélodies dont la dernière note variait en hauteur (donc en proximité avec la note précédente) et les participants devaient juger si elle convenait bien pour terminer la séquence. Dans une autre étude, les participants chantaient la suite des mélodies et les chercheurs analysaient la distance de hauteur entre la dernière note entendue et la première note chantée.

Les participants préfèrent produire ou entendre des notes proches en hauteur de la dernière entendue. Et ce, quel que soit leur âge, leur expertise musicale, leur origine culturelle et le style musical des mélodies.

DES INVARIANTS COGNITIFS

- **Une préférence pour des notes proches en hauteur.**
- **Un traitement des sons par catégories.**
- **Une mémoire à court terme de cinq à neuf éléments.**
- **L'information relative (le contour mélodique et le rythme) est privilégiée.**
- **On associe la musique à d'autres comportements, telle la danse.**
- **L'exposition à la musique et son apprentissage implicite, sans intention d'apprendre, entraînent des connaissances et des attentes musicales.**

Les invariants musicaux présents dans les différentes cultures refléteraient donc les mêmes contraintes perceptives et cognitives. L'apprentissage des régularités qui existent dans les structures musicales est une autre façon d'étudier comment le cerveau traite la musique.

En psychologie cognitive, on a mis en évidence une capacité qui permet d'acquérir des connaissances sur des informations complexes par simple exposition, sans intention d'apprendre. Ce type d'apprentissage est dit implicite : étant exposé à des matériaux structurés, le cerveau extrait des régularités et devient sensible aux structures sans connaissances explicites. C'est ainsi que l'enfant (avant sa scolarisation et les cours de grammaire) acquiert des connaissances sur sa langue maternelle en étant exposé aux flots de paroles de son environnement.

LES EXPERTS IMPLICITES

De même, la capacité cognitive d'apprentissage implicite permet aux auditeurs d'acquérir des connaissances sur le système musical de leur culture, notamment dans la vie quotidienne, par simple exposition à des pièces musicales (berceuses, radio…). Et ce, sans formation musicale explicite. L'auditeur est face à la musique comme l'enfant est face à sa langue maternelle : il traite les structures et développe des attentes, sans être capable de les expliciter. On parle d'acculturation musicale : l'auditeur est un expert implicite de la perception de la musique de sa culture.

La plupart des travaux sur la cognition musicale se sont intéressés à la perception de la musique occidentale tonale par l'auditeur occidental et à ses principales régularités qui s'appliquent à une variété de styles musicaux (musique classique, pop, folk, jazz…).

On sait qu'une même note peut remplir différentes fonctions musicales selon son contexte d'utilisation. Par conséquent, une note peut être adéquate pour finir une mélodie donnée, mais pas pour en terminer une autre. Pendant l'écoute, un auditeur acculturé développe donc des attentes perceptives sur les notes futures qui diffèrent selon le début de la mélodie.

Ces attentes musicales sont semblables aux attentes face au langage : un même mot, « neige » par exemple, est plus attendu après « Le skieur glisse sur la » qu'après « Le chauffeur conduit sur la ». Les connaissances sur la langue française, les relations sémantiques entre les mots et leur fréquence d'association permettent de développer des attentes sur la suite d'une phrase ; et ces attentes sont plus fortes pour un mot plus probable. Ainsi, lors d'une expérience de psychologie cognitive, un participant perçoit plus vite « neige » dans la première phrase que dans la seconde. Plus un événement est attendu, plus on le traite rapidement.

Cette expérience étudiant les connaissances de l'auditeur sur le langage a été >

transposée à l'étude des connaissances de la musique. On a proposé à des participants deux mélodies qui ne différaient que par une seule note. Musicalement, ce changement d'un demi-ton – une note proche en hauteur – laisse inchangé le contour mélodique, mais modifie la tonalité installée, de sorte que la dernière note de la mélodie est adéquate en note finale pour la première mélodie, mais ne l'est pas pour la seconde; cette dernière note prend la fonction de la tonique (la note la plus importante de la tonalité) dans la première mélodie, mais la fonction d'une sous-dominante (une fonction moins importante) dans la seconde.

Un auditeur non musicien, sans formation musicale explicite, fait-il cette différence, même si acoustiquement les deux mélodies sont presque identiques? Oui. Il traite plus rapidement la dernière note de la première mélodie. Comme il s'agit de la même information acoustique, cela suggère que l'auditeur a des connaissances sur le système musical et l'utilisation des notes, ce qui lui permet de distinguer les deux mélodies; en d'autres termes, les débuts des mélodies – qui varient du fait d'une note – activent différemment les connaissances musicales et engendrent des attentes perceptives distinctes, qui influent sur la perception de la dernière note. Voilà une démonstration de l'acculturation tonale des auditeurs occidentaux *via* une exposition à la musique occidentale tonale.

Quelques études avec des musiques et des auditeurs d'autres cultures confirment que l'acculturation par simple exposition est un invariant cognitif. Par exemple, en comparant la perception de la musique indienne par des auditeurs indiens – c'est-à-dire acculturés – et par des auditeurs américains – dits naïfs –, on constate que les deux groupes sont sensibles aux caractéristiques acoustiques des notes entendues (leur durée et leur fréquence d'apparition), mais seuls les auditeurs indiens perçoivent les différences d'organisation fonctionnelle des notes.

APPRENDRE EN ÉCOUTANT

Un autre exemple porte sur la perception des structures temporelles. Plusieurs études avaient montré que les auditeurs occidentaux préfèrent les rythmes avec des mesures simples (à deux ou trois temps). On pensait alors que les mesures plus complexes nécessitaient davantage de ressources cognitives.

En 2005, Erin Hannon et Sandra Trehub, de l'université de Toronto, bousculent cette interprétation en suggérant l'importance de l'acculturation musicale, même pour les structures temporelles. Ils montrent que les auditeurs américains perçoivent facilement les mesures simples pour lesquelles ils sont acculturés, mais qu'ils rencontrent des difficultés pour des mesures complexes. En revanche, des auditeurs bulgares et macédoniens sont sensibles aux deux types de mesures: ils sont acculturés pour les deux, car la musique folklorique des Balkans contient des mesures complexes.

De plus, Erin Hannon et Sandra Trehub ont montré que des bébés américains de six mois sont sensibles aux deux types de mesures; cependant, dès l'âge de 12 mois, l'acculturation s'est mise en place et les bébés américains obtiennent les mêmes résultats que les adultes américains. Les bébés pourraient donc apprendre différentes structures musicales (ici temporelles), mais après une période restreinte, ils se spécialiseraient aux caractéristiques musicales de leur culture.

Il existe donc des invariants cognitifs liés à la perception de la musique: les auditeurs apprennent des informations sur le système musical de leur culture par simple exposition – ils reconnaissent les notes utilisées, leur combinaison en gammes, leurs organisations –, et ces connaissances musicales implicites influent sur le traitement des structures musicales, par exemple par la formation d'attentes perceptives. Alors quelles sont les aires cérébrales dédiées au traitement des structures musicales? Existe-t-il des régions cérébrales et des capacités cognitives spécifiques à la musique?

De nombreuses études sur les fondements biologiques de la musique ont montré un recouvrement des réseaux neuronaux impliqués dans le traitement de la musique et du langage (*voir l'encadré page 20*). Par exemple, certaines études ont appliqué à la musique des méthodes expérimentales utilisées pour le langage, notamment en introduisant un événement inattendu dans une séquence musicale et en comparant la réaction du cerveau à cette violation de structure

Les berceuses sont universelles: on les reconnaît dans les autres cultures, même sans comprendre les paroles

avec sa réaction face à un événement qui respecte les structures musicales. Ainsi, on a montré que le cerveau réagit rapidement après une violation musicale (en 200 millisecondes après le début du son). Cette réaction est semblable à celle observée après la violation d'une structure syntaxique dans des phrases.

UNE AIRE DE MUSIQUE

En outre, par imagerie cérébrale, on a mis en évidence l'importance du cortex frontal inférieur (qui comprend l'aire de Broca et son homologue dans l'hémisphère droit) dans la musique. L'aire de Broca n'est donc pas spécialisée dans le traitement du langage : sa fonction est plus générale. Elle serait impliquée dans les mécanismes nécessaires à l'intégration structurale des informations, notamment au cours du temps – qu'il s'agisse des notes d'une mélodie ou des mots d'une phrase. En 2003, Aniruddh Patel, de l'Institut de neurosciences, à San Diego, aux États-Unis, émet l'hypothèse que des réseaux neuronaux pour le traitement des informations structurales ou syntaxiques sont partagés entre la musique et le langage.

Toutefois, Isabelle Peretz, de l'université de Montréal, et d'autres chercheurs défendent l'hypothèse que certains réseaux neuronaux sont spécifiques à la musique et séparés de ceux du langage. Notamment, certains patients souffrant de lésions cérébrales présentent des troubles du langage (nommés aphasies) sans troubles du traitement de la musique. Et d'autres patients ont les symptômes inverses : ils n'ont aucune difficulté avec le langage, mais montrent des troubles de traitement de la musique, l'amusie.

L'amusie congénitale, un dysfonctionnement de la perception musicale permettra peut-être d'en apprendre davantage. Pour les quelques personnes qui en sont atteintes, la musique ne fait pas sens, elle sonne comme une langue étrangère, voire comme du bruit. Elles comprennent normalement la parole et reconnaissent des voix et des sons de l'environnement. En revanche, elles sont incapables de reconnaître une mélodie familière sans paroles et de détecter une fausse note ou quelqu'un qui chante faux.

On estime qu'environ 4 % de la population souffre d'amusie congénitale (le révolutionnaire argentin Che Guevara en était atteint), mais la proportion réelle est probablement supérieure, car il est socialement peu acceptable de ne pas aimer la musique. Certaines personnes n'avoueraient pas leur handicap musical. Ce dernier contraste avec les capacités musicales des bébés et les connaissances musicales des adultes non musiciens.

Les fondements neuronaux de l'amusie congénitale commencent seulement à être étudiés. Le déficit musical serait présent dès la naissance (par opposition à l'amusie acquise liée à des lésions cérébrales) et des études récentes suggèrent même qu'il se transmet génétiquement. L'étude de l'amusie congénitale améliorera notre compréhension des fondements comportementaux, neuronaux et génétiques de la cognition musicale. Toutefois, à l'heure actuelle, les corrélats neuronaux spécifiques de la musique restent l'objet des recherches en neurosciences.

La liste des universaux en musique que nous avons mis en évidence est loin d'être exhaustive. Nous pouvons notamment ajouter les berceuses. De fait, on peut reconnaître une berceuse d'une autre culture (sans comprendre les mots) ou certaines émotions dans des pièces musicales d'une autre culture. Ces invariants seraient communs au langage et à la voix.

Les berceuses mettent en œuvre des caractéristiques acoustiques comparables à celles utilisées quand on parle à un bébé : un contour mélodique simple, des répétitions, une variété limitée de hauteurs…

De même, les émotions suscitées par la musique ont des caractéristiques retrouvées dans la voix. Par exemple, l'expression de la joie est souvent associée à un tempo rapide et à une large variété de hauteurs. Toutefois, certaines émotions, évoquées par les structures spécifiques d'un système musical, renvoient à l'invariant cognitif de l'acculturation musicale. Ainsi, un des universaux de la musique serait lié à un resserrement de son universalité à un contexte culturel particulier. Un comble ? ■

Che Guevara était atteint d'amusie congénitale : la musique sonnait pour lui comme une langue étrangère.

© Michal Ruccaya / shutterstock.com

BIBLIOGRAPHIE

F. MARMEL, B. TILLMANN ET W. DOWLING, Tonal expectations influence pitch perception, Perception & *Psychophysics*, vol. 70, pp. 841-852, 2008.

A. PATEL, Music, language and the brain, *Oxford University Press*, 2008.

E. HANNON ET S. TREHUB, Metrical categories in infancy and adulthood, *Psychological Science*, vol. 16, pp. 48-55, 2005.

I. PERETZ ET K. HYDE, What is specific to music processing? Insights from congenital amusia, Trends in *Cognitive Science*, vol. 7, pp. 362-367, 2003.

S. TREHUB, The developmental origins of musicality, *Nature Neuroscience*, vol. 6, pp. 669-673, 2003.

L'ESSENTIEL

- La musique, de la composition dodécaphonique et sérielle jusqu'aux morceaux pop, obéit à des règles mathématiques dont la connaissance facilite notablement l'analyse des compositions.
- Selon certains, cette structure mathématique serait naturelle et préexisterait dans notre cerveau, ce qui ouvrirait de nouvelles perspectives pour étudier la perception musicale.
- Au cœur de ces règles mathématiques, on trouve le concept de groupes et diverses transformations, notamment des symétries.

LES AUTEURS

MORENO ANDREATTA
est directeur de recherche CNRS en musicologie computationnelle à l'Ircam et à l'Institut de recherche mathématique avancée de Strasbourg.

CARLOS AGON
est professeur en informatique à Sorbonne Université et chercheur dans l'équipe Représentations musicales de l'Ircam.

Algèbre et géométrie : sont-elles inscrites dans le cerveau ?

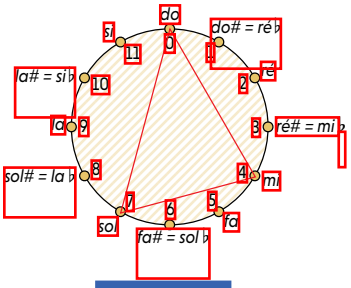
La musique contemporaine se comprend mieux avec les mathématiques et notamment avec la théorie des groupes. Ce sont des concepts abstraits, pourtant, ces structures seraient inhérentes à notre cerveau.

Au début du XVIIe siècle, le mathématicien suisse Leonhard Euler se penche sur une question cruciale: pourquoi la musique apporte-t-elle du plaisir? Dans son *Tentamen novae theoriae musicaeex certissimis harmoniae principiis dilucide expositae* («Essai d'une nouvelle théorie de la musique, exposée en toute clarté selon les principes de l'harmonie les mieux fondés»), en 1739, il répond. Selon lui, l'élément clé est la perfection, qu'il recherche dans les rapports de nombres représentant les accords.

Euler est l'un des nombreux mathématiciens, depuis Pythagore, qui se sont intéressés à la musique. Depuis une vingtaine d'années, grâce à l'informatique, l'étude des relations entre mathématiques et musique a connu de nombreux développements. La musicologie est devenue une discipline systématique, jusqu'à donner naissance à un nouveau champ d'études, la «musicologie computationnelle». Il s'agit d'analyser les œuvres musicales de façon à mettre en évidence les structures mathématiques sous-jacentes.

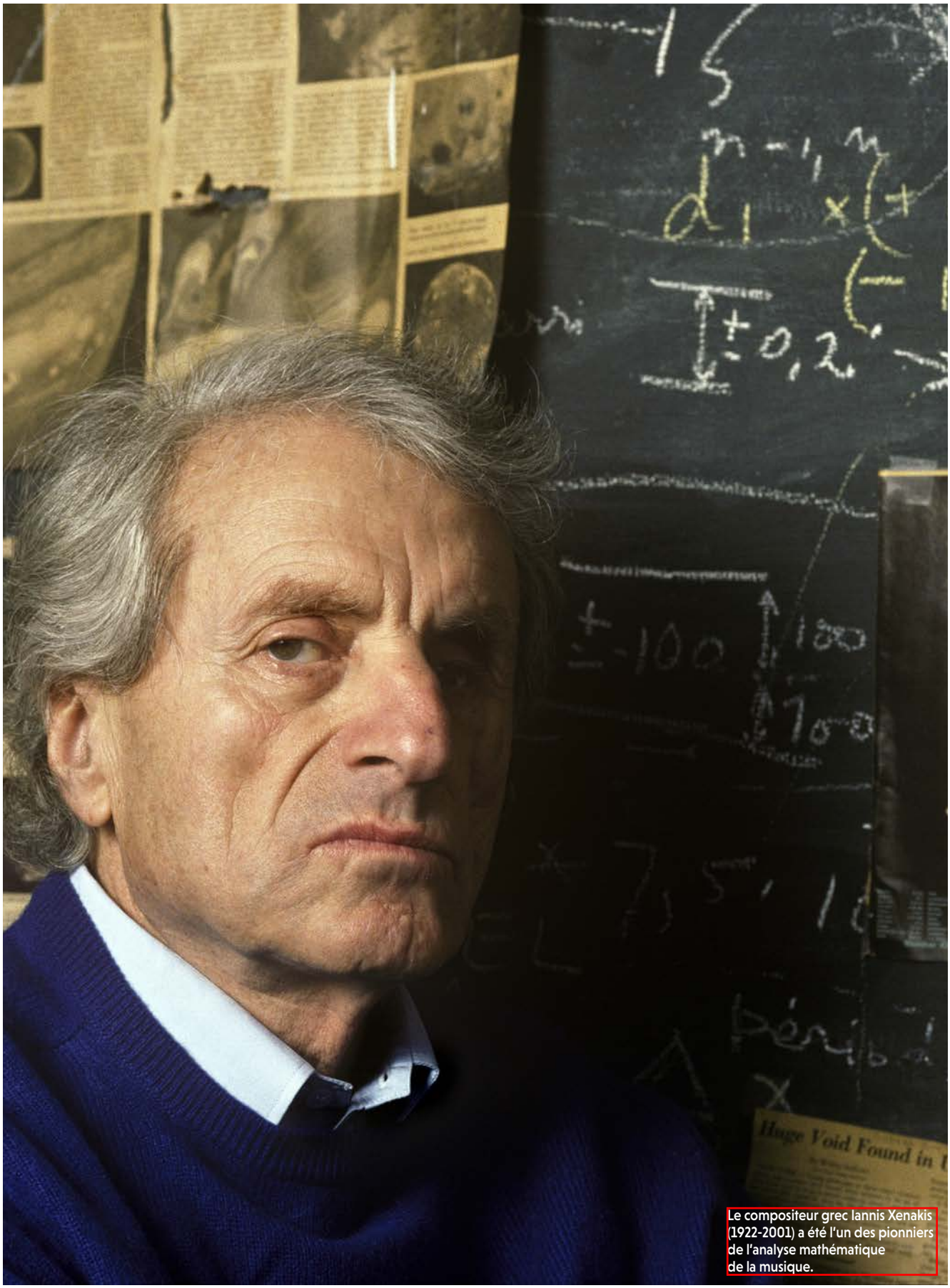
Cependant, à mesure qu'elle prenait son essor, la musicologie computationnelle s'est éloignée d'autres démarches systématiques, en particulier celles orientées vers la cognition et la perception musicales. Les deux visions sont-elles compatibles? Oui et, plus encore, nous verrons qu'elles s'enrichissent mutuellement dans un dialogue entre mathématiques et cognition.

L'utilisation des méthodes algébriques pour étudier la musique, notamment contemporaine, met en œuvre trois aspects souvent liés, à savoir les aspects théoriques et analytiques, qui nous intéresseront ici, ainsi que ceux d'aide à la composition. Trois compositeurs et théoriciens sont emblématiques de cette réflexion théorique sur >



LA GAMME TEMPÉRÉE

La gamme tempérée, c'est-à-dire celle où toutes les notes sont séparées par un demi-ton, correspond à l'octave d'un piano. Elle est représentée par un cercle où chaque note est numérotée, les dièses (#) et les bémols (♭) étant considérés comme équivalents selon le principe de l'identification enharmonique (par exemple le *do#* est égal au *ré♭*). Dans cette représentation, un ensemble de *n* notes, par exemple un accord ou une série dodécaphonique, correspond à un polygone à *n* côtés *(en rouge)*.



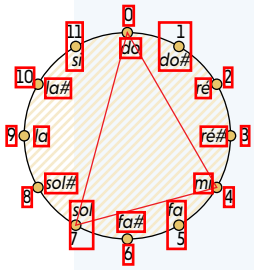
Le compositeur grec Iannis Xenakis (1922-2001) a été l'un des pionniers de l'analyse mathématique de la musique.

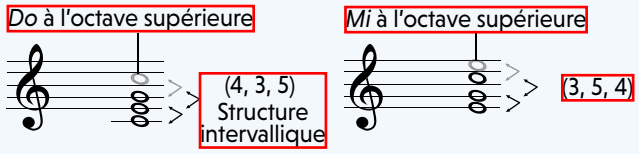
© Ulf Andersen / GettyImages

UNE BOÎTE À OUTILS MUSICALE

La structure intervallique

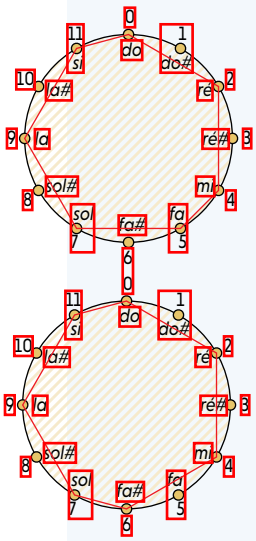
La structure intervallique est constituée de la suite d'intervalles (en demi-tons) séparant les notes consécutives d'un ensemble. Dans la représentation circulaire, elle correspond aux intervalles entre les sommets du polygone à *m* côtés correspondant à l'ensemble de notes. Par exemple, la structure intervallique de l'accord majeur *(voir les Repères, page 6)*, tel *do*, *mi* et *sol*, est égale à (4, 3, 5). Les permutations circulaires de cette structure intervallique – (3, 5, 4) et (5, 4, 3) – correspondent aux renversements de l'accord. La représentation circulaire est identique dans les trois cas.

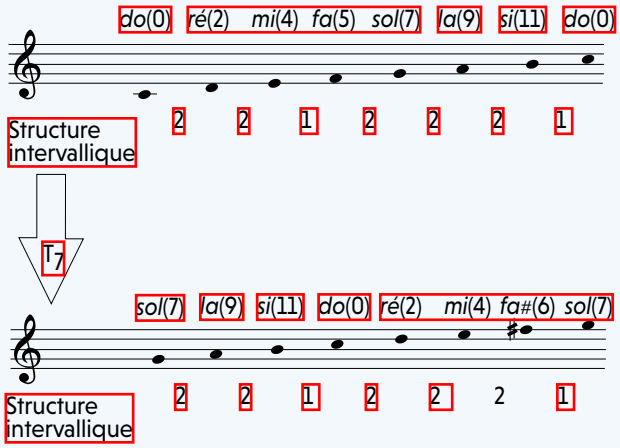




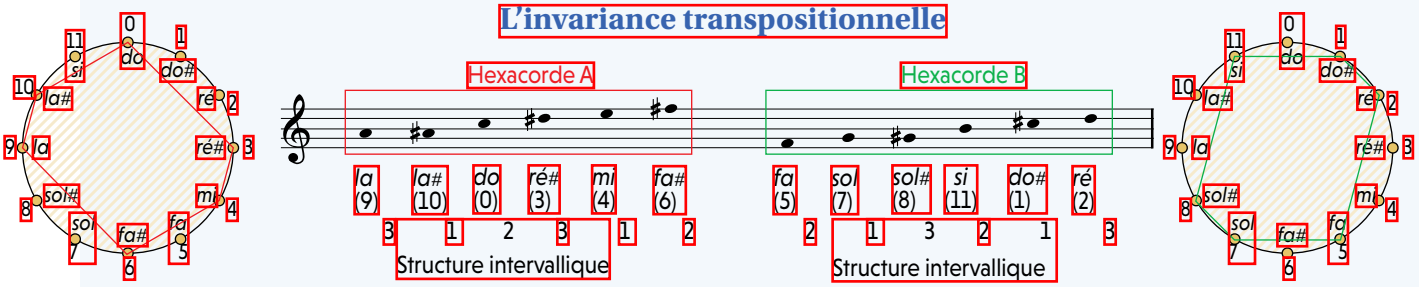
La transposition

La transposition est une addition modulo 12. Elle laisse inchangée la structure intervallique d'une gamme ou d'un accord. Imaginons une transposition de sept demi-tons (à chaque note, on ajoute 7 modulo 12) de la gamme diatonique : ainsi, de *do* (0) on passe à *sol* (7) et de *la* (9) on passe à *mi* (4), car $(9+7)_{12}=4$. Dans la représentation circulaire, cette transposition correspond à une rotation du polygone correspondant. En d'autres termes, la structure intervallique est un invariant qui permet d'identifier de façon unique un accord et ses transpositions d'un nombre donné de demi-tons, celles-ci étant des rotations du polygone inscrit dans le cercle : la structure intervallique est préservée.



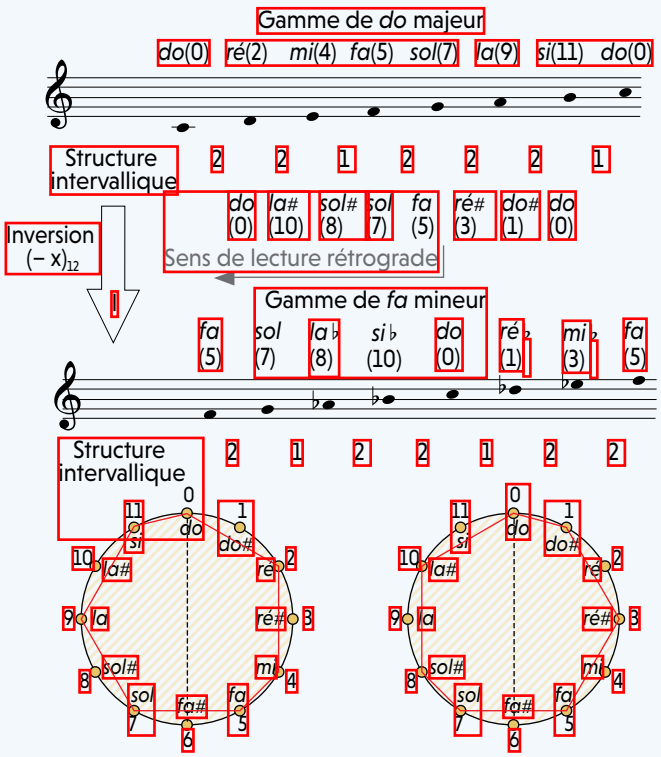


L'invariance transpositionnelle



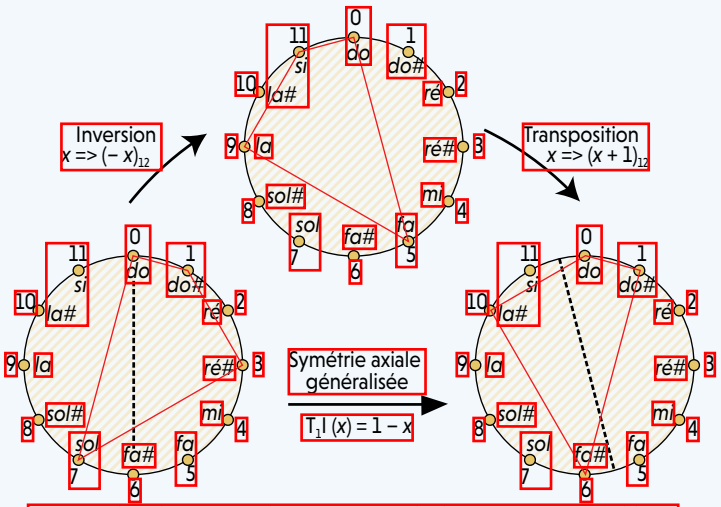
La structure intervallique met en évidence la symétrie interne de certaines séries de notes, tel un accord ou une gamme. Par exemple, des accords coïncident avec une, voire plusieurs de leurs transpositions. Une telle structure se nomme, d'après le compositeur français Olivier Messiaen (1908-1992), un mode à transpositions limitées. Tout mode de ce type est donné par une structure intervallique ayant des périodicités internes, c'est-à-dire des sous-structures intervalliques qui se répètent. On trouve de telles structures par exemple lorsqu'on partage une série dodécaphonique de Schoenberg dans le cinquième mouvement de la *Serenade* op. 24 en deux hexacordes (A et B). Chacun des deux hexacordes est doté d'une propriété d'invariance transpositionnelle : dans les deux cas, la structure intervallique est « redondante », c'est-à-dire qu'elle se décompose en deux structures intervalliques plus petites identiques, respectivement (3, 1, 2) et (2, 1, 3). Les deux hexacordes ne sont pas équivalents à une transposition près, car les structures intervalliques correspondantes ne sont pas les rotations circulaires l'une de l'autre : elles sont chacune la lecture rétrograde de l'autre.

L'inversion



L'inversion est une opération sur une gamme (ou un accord ou une série dodécaphonique) qui associe à chaque nombre *x* l'opposé (– *x*) modulo 12. Géométriquement, cela se traduit par une symétrie de la structure intervallique associée par rapport à un axe. L'exemple le plus simple d'inversion est celui d'une symétrie par rapport au diamètre principal (l'axe qui passe par les points *do* = 0 et *fa#* = 6). Ainsi, la gamme de *fa* mineur mélodique est une inversion de la gamme de *do* majeur.

La symétrie axiale généralisée



La symétrie axiale généralisée est la combinaison d'une transposition et d'une inversion, c'est-à-dire d'une transposition et d'une symétrie autour du diamètre principal *(do-fa)*. On obtient alors des symétries génériques qui correspondent à des réflexions par rapport à des axes qui ne passent par aucun point du cercle de la gamme tempérée.

la musique : l'Américain Milton Babbitt (1916-2011), le Grec Iannis Xenakis (1922-2001) et le Roumain Anatol Vieru (1926-1998). Tous les trois sont arrivés, presque au même moment et d'une façon indépendante, à la découverte du caractère algébrique du tempérament égal, c'est-à-dire que dans une gamme dite tempérée, chaque note est séparée de sa voisine par un demi-ton (*do*, *do#*, *ré*, *ré#*, *mi*, *fa*..., soit une gamme à 12 demi-tons, ce qui diffère notablement de la gamme dite diatonique à 7 tons *do*, *ré*, *mi*, *fa*..., ce qui correspond aux touches blanches du clavier). Plus précisément, ils ont mis en évidence la notion mathématique de *groupe* en tant que concept unificateur. Grâce à quelques exemples, nous verrons comment cette notion aide à analyser la musique.

DE GROUPE EN GROUPE

La notion de groupe est née au début du XIXe siècle des travaux sur les racines de polynômes, notamment ceux d'Évariste Galois et de Joseph-Louis Lagrange. Cependant, cette structure ne fut utilisée en musique qu'à partir de la seconde moitié du XXe siècle grâce à Milton Babbitt. On lui doit l'observation fondamentale selon laquelle le système dodécaphonique est « un groupe de permutations qui est façonné par la structure de ce modèle mathématique ». En quoi consiste la musique dodécaphonique ?

Elle se distingue de la musique tonale où une des sept notes de la gamme diatonique prédomine sur les autres et leur impose une hiérarchie. En 1923, Arnold Schoenberg (1874-1951) veut échapper à ce diktat et établit la méthode de composition avec 12 sons (d'où le nom dodécaphonique), qui donne le même mérite à chaque note de la gamme tempérée ou à tempérament égal.

Une composition dodécaphonique est fondée sur une séquence de ces 12 sons musicaux distincts, sans répétition, nommée série élémentaire. L'œuvre est une combinaison de cette série et d'autres séries dérivées par des symétries.

Notons d'abord que chaque nombre, représentant une note, est une classe d'équivalence modulo 12, c'est-à-dire que chaque nombre représente, d'une part, ce nombre, mais aussi ce nombre additionné d'un multiple de 12. Par exemple, 1 est équivalent à 49 ou à –11. L'addition de deux nombres devient une addition modulo 12 : par exemple, $(3 + 8)_{12} = 11$, $(5+9)_{12} = 2$.

Examinons maintenant les symétries, à partir d'une série élémentaire P. La série rétrograde R est P jouée à l'envers. Dans la série renversée I, les nombres de la série élémentaire P sont remplacés par leurs nombres opposés modulo 12. La série renversée rétrograde RI est obtenue de P en appliquant les deux opérations précédentes. Enfin, la série transposée de P par *k* demi-tons est obtenue par l'addition modulo 12 de *k* à tous les nombres de la série P. De même, nous obtenons les

transposées par k demi-tons d'une série rétrograde T_kR, d'une série renversée T_kI et d'une série renversée rétrograde T_kRI.

La musique sérielle est une extension du dodécaphonisme où l'idée de série est appliquée aux notes, mais aussi aux rythmes, aux intensités et à tous les paramètres du son.

L'ensemble des entiers modulo 12 offre un premier exemple musical de structure de groupe, celui noté $\mathbb{Z}/12\mathbb{Z}$. Il peut être interprété musicalement de plusieurs façons: soit comme le groupe des intervalles musicaux (avec l'addition modulo 12), soit comme un groupe de transformations, celui engendré par les transpositions, l'un des types des transformations utilisées dans la technique dodécaphonique. On peut représenter ce groupe par un cercle, celui-ci correspondant à une octave, divisé en 12 parties.

L'hypothèse sous-jacente de cette représentation circulaire est qu'elle permet de formaliser tout accord musical: tout accord de m notes distinctes correspond, d'un point de vue géométrique, à un polygone à m côtés inscrit dans le cercle (*voir la figure page 24*).

Dans la tradition américaine, la note *do* est notée 0, tandis que les compositeurs sériels européens de la seconde moitié du XX^{e} siècle, tels le Français Pierre Boulez (1925-2016) et l'Allemand Karlheinz Stockhausen (1928-2007), ont privilégié une autre représentation faisant correspondre au *do* l'entier 1. La différence entre les écoles américaine et européenne est moins une différence de notation qu'une distance conceptuelle qui sépare les deux traditions théoriques. Dans cet article, nous adopterons la notation américaine.

Milton Babbitt propose au début des années 1950 d'exprimer les opérations sérielles comme des transformations de la structure du groupe cyclique $\mathbb{Z}/12\mathbb{Z}$. En effet, il remarque que l'on peut interpréter les quatre formes d'une série dodécaphonique (P, R, I et RI) comme les quatre transformations suivantes:

P: $(a, b) \Rightarrow (a, b)$
I: $(a, b) \Rightarrow (a, (12-b)_{12})$
R: $(a, b) \Rightarrow (11-a, b)$
IR: $(a, b) \Rightarrow (11-a, (12-b)_{12})$

Ici, la série dodécaphonique P est représentée par une suite de couples (a, b), a indiquant la position de la note dans la série et b, la note (relative à une origine 0). Ces quatre transformations d'une série dodécaphonique et, plus généralement, d'un profil mélodique constituent les éléments d'une structure algébrique nommée groupe de Klein de quatre éléments. Il tient compte de toutes les transformations de la musique dodécaphonique, alors que le groupe cyclique $\mathbb{Z}/12\mathbb{Z}$ ne rend compte que des transpositions.

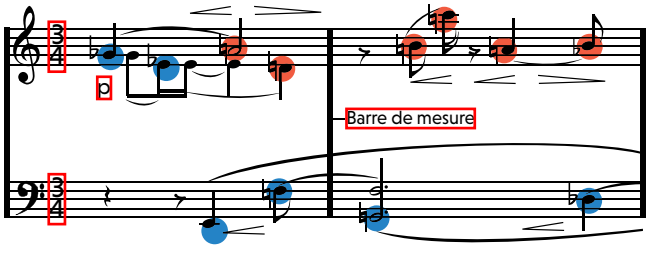
Le groupe cyclique $\mathbb{Z}/12\mathbb{Z}$ et le groupe de Klein ne sont pas les seules structures algébriques intéressantes en musique. Deux autres groupes sont importants, mais avant de les décrire, nous devons définir deux concepts importants, celui de la structure intervallique – l'énumération des intervalles, en demi-tons, qui séparent les notes successives d'un accord – et de la symétrie axiale généralisée, soit la composition d'une transposition et d'une inversion (*voir l'encadré page 26*). La représentation circulaire de ces deux idées, ajoutées à celles de la transposition et de l'inversion, nous fournira un ensemble d'outils d'analyse qui nous aideront à comprendre la structure de diverses œuvres.

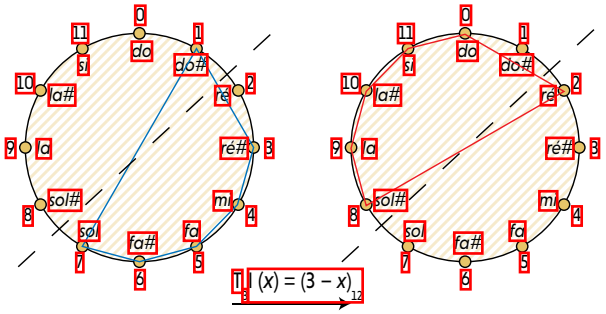
UNE BOÎTE À OUTILS

Ainsi, la notion de symétrie axiale généralisée nous éclaire sur la composition d'une polyphonie sérielle constituée de deux hexacordes (séries de six notes) liés par une telle symétrie (*voir la figure ci-dessous*). Le recours à une symétrie axiale généralisée dans le sérialisme n'est pas étonnant, car cette technique de composition est fondée sur une structure mathématique de groupe. En revanche, et cela soulève des questions quant au caractère universel de certaines constructions algébriques, on trouve de telles symétries chez des compositeurs utilisant d'autres techniques que le sérialisme, par exemple dans la musique modale d'Olivier Messiaen ou dans des chansons de musique pop (*voir l'encadré page 31*).

En musique, le mode d'une gamme est constitué des mêmes notes que la gamme dont il est issu, mais a une sonorité qui lui est propre, caractérisée par une tonique et par les intervalles entre cette tonique et les autres notes. Par exemple, à partir de la gamme de *do* majeur, dont la tonique est la note *do* (*do*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la* et *si*), avec pour structure intervallique (en demi-tons: 2, 2, 1, 2, 2, 2, 1), on peut déplacer l'axe tonal sur la deuxième note afin d'obtenir un

LA SYMÉTRIE AXIALE GÉNÉRALISÉE permet d'analyser cet extrait d'une polyphonie sérielle *(à gauche)* à deux voix. Ces deux voix correspondent à deux hexacordes *(l'un en bleu, l'autre en rouge)* liés par une symétrie axiale généralisée, comme le montre la représentation circulaire *(à droite)*. On peut aussi vérifier que si on segmente l'extrait en deux parties correspondant aux barres de mesure, on obtient également deux hexacordes en rapport de symétrie axiale généralisée.





nouveau mode (en *ré*) ayant une nouvelle structure intervallique (2, 1, 2, 2, 2, 1, 2) en conservant les mêmes notes (*ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si* et *do*). Dans ce type de composition, on privilégie des notes ou des intervalles au détriment des autres.

Nous pouvons maintenant aborder les deux autres groupes importants en musique. Commençons par le groupe diédral. Il s'agit de l'ensemble de toutes les compositions (au sens mathématique) des transpositions et des inversions. En d'autres termes, c'est le groupe des symétries axiales généralisées. Le nom diédral (à deux faces) indique que d'un point de vue géométrique, ce groupe correspond au groupe des symétries d'un polygone régulier de *n* côtés dans le plan. Ces symétries sont de deux types : rotations et réflexions (ou miroirs par rapport à un axe). Musicalement, les rotations correspondent aux transpositions et les réflexions sont des inversions par rapport soit à une note choisie comme pôle, soit à une note « imaginaire » qui se trouve entre deux notes à distance d'un demi-ton, quand l'axe de symétrie ne passe pas par une note du cercle chromatique. Un exemple d'application du groupe diédral pour l'analyse musicale concerne la *Pièce pour piano* op. 33a, écrite par Schoenberg en 1929 (*voir la figure ci-contre*).

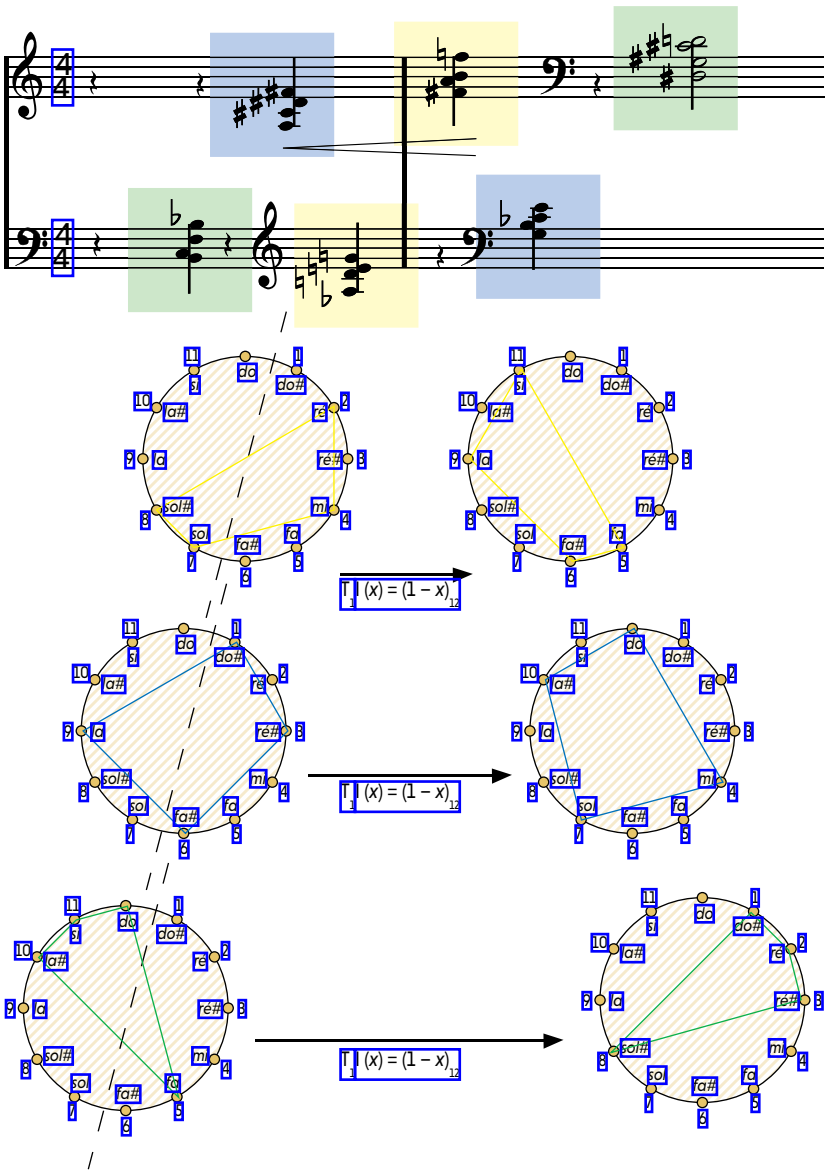
D'une façon plus générale, les parties résultant de la segmentation de l'œuvre peuvent avoir des intersections ; on parle alors d'une segmentation par imbrication. Un exemple d'une telle démarche est l'analyse que le théoricien américain David Lewin propose du *Klavierstück III*, de Stockhausen (*voir la figure page suivante, en haut*).

Dans son analyse, David Lewin distingue deux stratégies. Selon la première, les transformations sont organisées dans un ordre qui reflète le déroulement temporel de la pièce. Cette vision « chronologique » de l'organisation des transformations est une progression transformationnelle. Ici, le processus de segmentation par imbrication met en évidence une structure de pentacorde (une série de cinq notes), où l'on passe de l'un à l'autre (les deux ayant des notes en commun) grâce à une symétrie axiale généralisée : tous les pentacordes sont reliés par des transpositions et des inversions.

RÉSEAUX ET PERCEPTION

L'autre stratégie consiste à voir les transformations comme une structuration possible d'un espace abstrait, un réseau transformationnel, des formes du pentacorde dans lequel on analyse le déroulement de la pièce. Dans le réseau transformationnel du *Klavierstück III*, tous les pentacordes sont liés par des relations de transposition et d'inversion. Ici, à l'inverse de la progression transformationnelle, l'organisation des formes du pentacorde dans un réseau n'a aucun lien direct avec leur apparition chronologique.

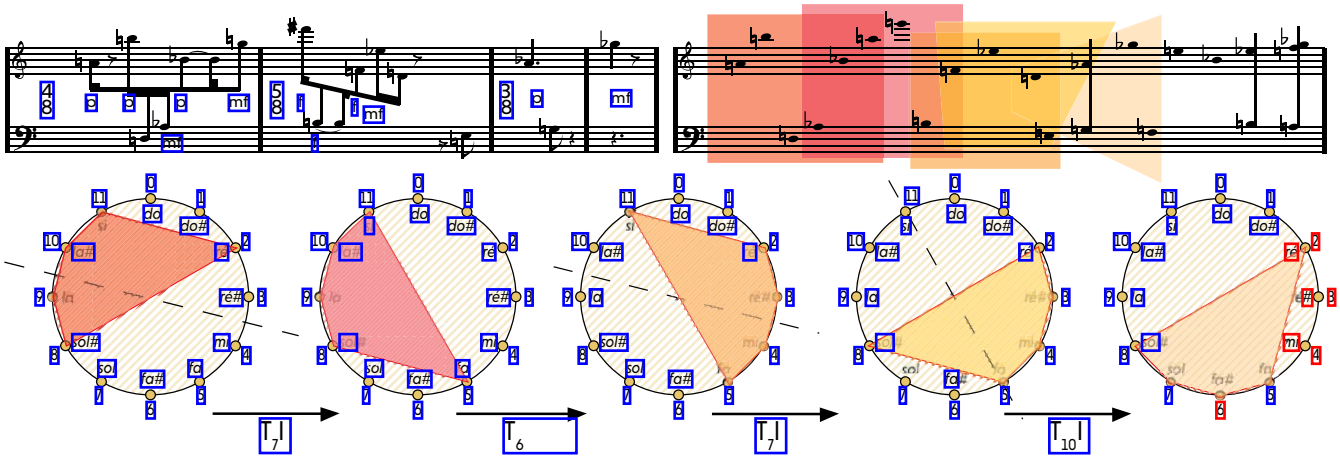
Dans un réseau, on retrouve parfois les mêmes configurations de correspondances entre



LES ACCORDS DE *LA PIÈCE POUR PIANO* OP 33A, de Schoenberg, sont disposés de façon symétrique dans la partition. Il s'agit d'un exemple du paradigme du groupe diédral, car une symétrie axiale généralisée, la même dans les trois cas, relie chaque couple d'accords.

pentacordes de la pièce dans des régions différentes : ce sont des isographies à partir desquelles on peut imaginer un lien étroit entre les réseaux transformationnels et la perception musicale. L'écoute de la pièce deviendrait ainsi l'un des parcours à l'intérieur de ce réseau avec la possibilité de repérer les isographies. Des études récentes menées par Stephen McAdams et son équipe à l'université McGill, ont montré la pertinence perceptive de ce modèle analytique d'un point de vue de la psychologie expérimentale.

Passons maintenant au groupe affine d'ordre 48. Il est l'ensemble des fonctions f qui transforment un élément x de $\mathbb{Z}/12\mathbb{Z}$ en $(ax+b)_{12}$, où a est premier avec 12 et b appartient à $\mathbb{Z}/12\mathbb{Z}$. Le facteur multiplicatif a appartient donc à l'ensemble $U=\{1, 5, 7, 11\}$. Dans ce cadre, une transformation affine se réduit à une transposition quand $a=1$ et à une inversion lorsque $a=11$. Le théoricien américain Robert Morris a montré que les transformations affines sont compatibles avec >



des techniques utilisées par les musiciens de jazz, comme, par exemple, la substitution d'accords.

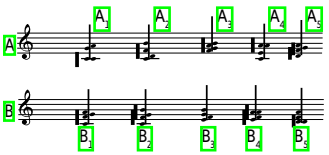
La description de ces différents groupes nous conduit à l'approche dite paradigmatique du problème de la classification des structures musicales. Nous avons intégré ce concept d'analyse musicale, qui s'inspire des travaux du linguiste belge Nicolas Ruwet, dans notre démarche d'analyse musicale computationnelle. Grâce à OpenMusic, un langage de programmation visuelle pour la théorie, l'analyse et la composition assistées par ordinateur, conçu et développé à l'Ircam, un catalogue d'accords, ainsi qu'une analyse qui utilise ce catalogue, est valable à l'intérieur d'un paradigme qui sera plus ou moins pertinent selon le type de contexte qu'il essaie de décrire.

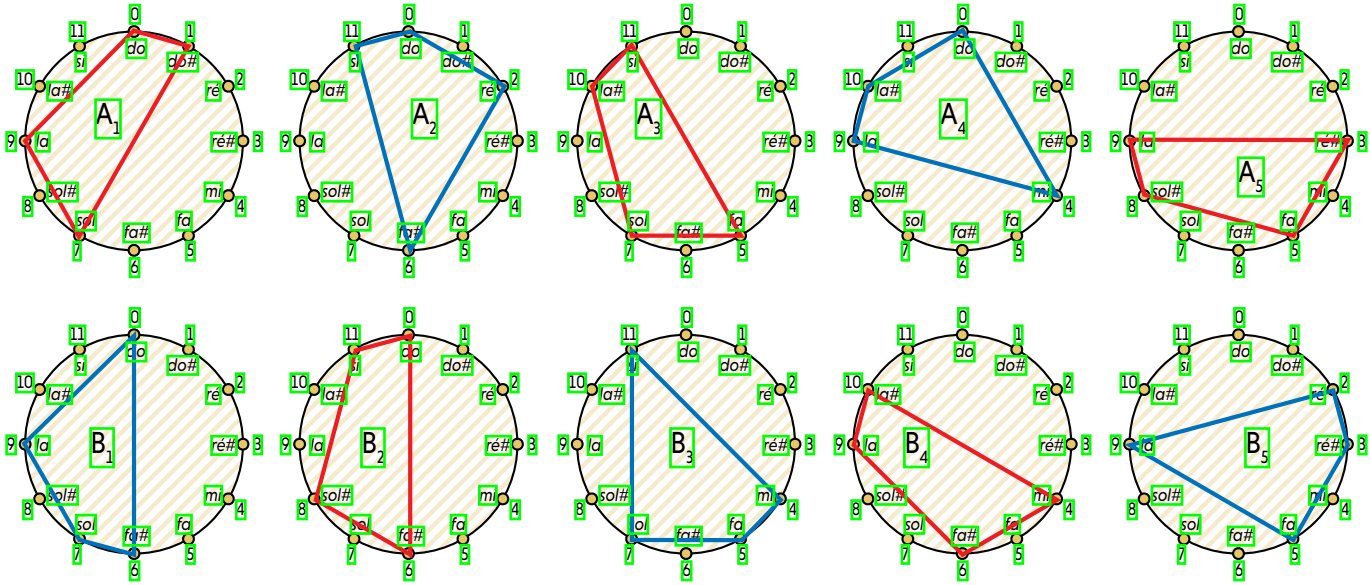
L'application de la théorie des groupes à la classification des structures musicales soulève des questions qui dépassent l'étude combinatoire du système tempéré. En effet, le philosophe allemand Ernst Cassirer (1874-1945) a étudié les relations entre le concept de groupe et les théories de la perception. Il a montré que la ressemblance perceptive entre différentes transpositions d'un même profil mélodique est liée «à un problème beaucoup plus général, un problème qui concerne les mathématiques abstraites». On peut compléter: le groupe des transpositions engendre une relation d'équivalence entre structures musicales. En d'autres termes, une mélodie est reconnaissable à une transposition près.

LES PREMIÈRES MESURES du *Klavierstück III*, de Stockhausen: un processus de segmentation «par imbrication» met en évidence une structure de pentacorde (cinq notes) à partir de laquelle toutes les notes de la partition sont obtenues, grâce à des transpositions et à des symétries axiales généralisées.

LA PERCEPTION ALGÉBRIQUE

Peut-on généraliser cette propriété aux autres paradigmes? Malheureusement, dans le cas d'autres structures algébriques, comme les trois autres groupes que nous avons détaillés, le problème n'a pas fait l'objet d'études approfondies. Pourtant, les compositeurs qui ont, consciemment ou non, utilisé ce type de transformations en musique n'étaient sans doute pas insensibles



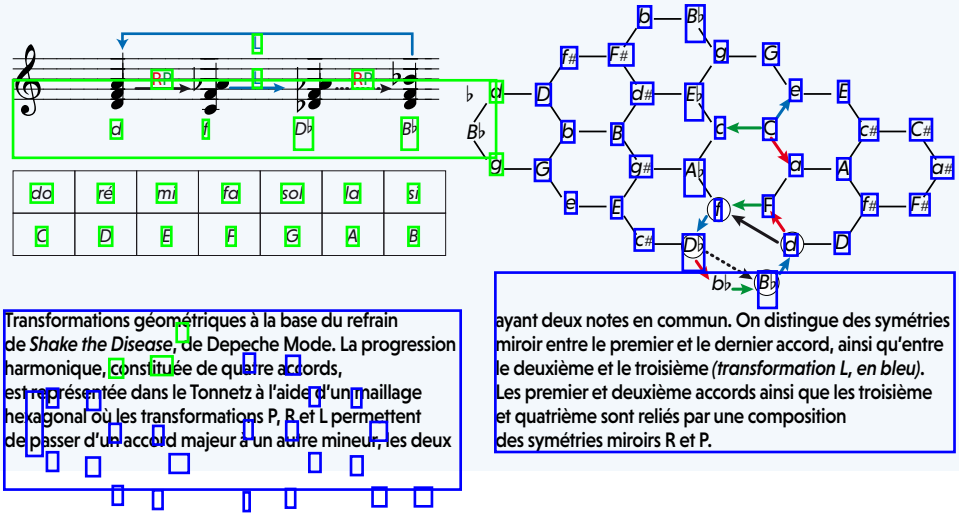


LES PROGRESSIONS A et B sont «préservées», dans leur caractère cadentiel, par les transformations affines: si on les analyse à l'aide des représentations circulaires, on constate qu'elles sont constituées de seulement deux types d'accords (en rouge et en bleu) qui alternent via l'application affine.

GÉOMÉTRIE ET MUSIQUE POP

Qu'ont en commun *Madeleine* de Paolo Conte, *Easy Meat* de Frank Zappa et *Shake the Disease* de Depeche Mode ? Étonnamment, ces pièces partagent une même préoccupation quant à l'organisation harmonique ou, plus exactement, l'utilisation des symétries dans le déploiement des accords consonants majeurs et mineurs dans l'espace tonal. Pour mettre en évidence ces similitudes, nous pouvons utiliser la représentation circulaire, mais aussi une représentation géométrique dont les origines remontent à Euler : le Tonnetz (ou « réseau des notes »).

Au XVIIIe siècle, ce mathématicien suisse a proposé de considérer les notes et les tonalités comme des points d'un espace bidimensionnel, une représentation géométrique qu'il nomme le *speculum musicum*. Dans la tradition analytique américaine, le Tonnetz correspond à une triangulation de l'espace bidimensionnel où chaque triangle représente un accord majeur ou mineur, les deux types d'accords étant reliés par trois symétries : le « parallèle » (P), le « relatif » (R) et le « *leading tone* » (L). On peut les représenter dans un espace où chaque triangle est remplacé par un point. Le « dual » ainsi obtenu *(voir la figure)* est un maillage hexagonal, chaque sommet indiquant un accord majeur ou mineur *(ici représenté dans la notation américaine, avec des lettres en majuscule pour les accords majeurs et en minuscule pour les mineurs)*. Avec ce procédé, chaque côté de l'hexagone correspond à l'une des trois symétries R, P et L. Le refrain de *Shake the Disease* est constitué de quatre accords qui se répètent cycliquement en déployant diverses symétries. Une première *(en noir)* est celle reliant deux accords (*ré* mineur et *fa* mineur) et obtenue en composant les symétries R *(flèche rouge)* et P *(flèche verte)*. Une transformation similaire est celle *(en pointillé noir)*, reliant les deux accords majeurs (*ré* bémol et *si* bémol). La transformation entre le deuxième et le troisième accord, ainsi que celle clôturant le cycle, change la nature de l'accord (on passe de *fa* mineur à *ré* bémol majeur et de *si* bémol majeur à *ré* mineur). Elle correspond à la troisième symétrie du maillage hexagonal, la symétrie L *(flèche bleue)*.



Transformations géométriques à la base du refrain de *Shake the Disease*, de Depeche Mode. La progression harmonique, constituée de quatre accords, est représentée dans le Tonnetz à l'aide d'un maillage hexagonal où les transformations P, R et L permettent de passer d'un accord majeur à un autre mineur, les deux ayant deux notes en commun. On distingue des symétries miroir entre le premier et le dernier accord, ainsi qu'entre le deuxième et le troisième *(transformation L, en bleu)*. Les premier et deuxième accords ainsi que les troisième et quatrième sont reliés par une composition des symétries miroirs R et P.

BIBLIOGRAPHIE

M. ANDREATTA, Math'n pop : géométrie et symétrie au service de la chanson, *Hors-Série Tangente*, n° 51, pp. 92-97, 2013.

L. BIGO, *Représentations symboliques musicales et calcul spatial*, thèse, Université Paris Est, Ircam, 2013.

Y. CAO *ET AL.*, *The perception and learning of contextually-defined inversion operators in transformational pitch patterns*, 5th International Conference of Students of Systematic Musicology, Montreal, 2012.

M. ANDREATTA *ET AL.*, *Autour de la Set Theory. Rencontre Musicologique Franco-Américaine*, Collection « Musique/Sciences », Ircam-Delatour, 2008.

à des considérations d'ordre perceptif. On a vu plusieurs exemples d'utilisation musicale de la symétrie axiale généralisée et d'invariance par rapport à l'action d'un groupe sur un ensemble. Certains compositeurs, tel Elliot Carter, ont utilisé intuitivement le paradigme diédral.

L'hypothèse d'une articulation entre progressions et réseaux transformationnels que nous avons décrite dans le cas de l'analyse par David Lewin du *Klavierstück III*, de Stockhausen, conduit à proposer une alternative aux approches traditionnelles de l'analyse des formes temporelles.

L'analyse transformationnelle implique, d'une part, la « construction » d'un réseau, mais aussi, d'autre part, l'« utilisation » de cette architecture formelle pour dégager des critères de pertinence pour la réception de l'œuvre et pour son interprétation. Autrement dit, l'intérêt de construire un réseau transformationnel réside dans la possibilité de l'utiliser, à la fois pour « structurer » l'écoute et pour établir des critères formels utiles à son interprétation. En effet, la construction d'un réseau transformationnel s'appuie sur une volonté implicite de rendre « intelligible » une logique musicale à l'œuvre dans la pièce analysée.

Cette démarche analytique a probablement des implications théoriques inédites pour les sciences cognitives. Ainsi, l'approche transformationnelle non seulement représenterait un tournant en théorie et analyse musicales, mais elle déterminerait aussi une position singulière dans les rapports entre mathématiques, musique et cognition.

En somme, le concept de groupe est loin d'être simplement un outil technique de calcul. Souvenons-nous de ce que disait le mathématicien Henri Poincaré : « Le concept général de groupe préexiste dans notre esprit. Il s'est imposé à nous, non pas comme une forme de notre sensibilité, mais comme une forme de notre entendement. » C'est à nous, un siècle après, d'en tirer toutes les conséquences en musique. ■

Sur un air d'évolution

Les émotions musicales sont reconnues instantanément, aussi vite qu'un signal de danger. D'où sa valeur adaptative : la musique favorise la cohésion sociale. Au point d'adoucir les mœurs ?

© Alvaro Diapollonio / EyeEm / GettyImages

Qui n'a jamais ressenti de frissons en écoutant un morceau de musique ? Que ce soit le *Requiem*, de Mozart, *La Jeune Fille et la Mort*, de Schubert, une ritournelle bien troussée, un tube soul des années 1970, la musique exerce un effet profond sur l'être humain bien au-delà des sphères restreintes des mélomanes cultivés. Selon des statistiques économiques, la musique représenterait l'un des marchés les plus développés, bien avant l'industrie pharmaceutique. Les pratiques musicales ont une importance notable tant dans les sociétés industrialisées que dans les sociétés non occidentales. Ainsi, dans certaines cultures traditionnelles, on consacre plus de temps aux activités musicales qu'à celles dont dépend la tribu, la chasse notamment. Pourquoi la musique a-t-elle un tel impact ? C'est aujourd'hui un important objet d'études en neurosciences et en psychologie cognitive.

Les processus cognitifs impliqués dans la perception musicale (comment le cerveau traite-t-il les informations musicales ?) sont étudiés depuis longtemps, alors que les réponses affectives à la musique (comment la musique déclenche-t-elle des émotions ?) ont été négligées jusqu'à présent. Pourtant, si nous écoutons de la musique, ce n'est pas pour le plaisir d'entendre des structures sonores bien construites, que notre cerveau redéploierait lors de l'écoute, même si cette conception très formaliste correspond sans doute à une réalité pour certains mélomanes érudits.

ANALYSE ET ÉMOTIONS

Pour beaucoup de compositeurs et pour la plupart des auditeurs, le propre de la musique est d'être expressive. La musique renvoie à autre chose qu'aux sons et aux architectures sonores qui la composent : elle nous plonge dans des états psychologique et physiologique spécifiques, qui ne se confondent pas avec l'excitation sensorielle produite par les signaux acoustiques et qui se différencient clairement de l'état psychologique déclenché par les autres stimulations sonores de l'environnement.

L'étude de la perception de la musique auprès des enfants malentendants en est une démonstration. Lorsque le signal acoustique, tout appauvri qu'il soit par la surdité, est perçu comme une production musicale, l'émotion devient manifeste dans le regard de celui qui l'écoute. Ce n'est d'ailleurs pas un hasard si le second souhait le plus fréquemment exprimé par les personnes atteintes d'une surdité profonde est de pouvoir retrouver la perception de la musique (juste après celui de mieux comprendre le langage). La musique ouvre sur un monde sensible où émotions, expressions et sentiments se côtoient.

Les sciences des activités mentales ont longtemps dominé les sciences de l'affectivité, y compris dans le domaine de la musique. À l'image >

L'ESSENTIEL

- La musique déclenche un état psychologique et un état physiologique que n'entraînent pas les sons non musicaux.
- Toutes les émotions musicales sont constituées à des degrés divers des quatre émotions fondamentales: la colère, la sérénité, le désespoir et la gaieté.
- On reconnaît qu'une musique est triste ou gaie aussi vite que l'on identifie un stimulus biologiquement pertinent, par exemple un signal de danger.
- On en déduit que la musique a un statut bien spécifique pour l'espèce humaine et qu'elle a des vertus adaptatives.

L'AUTEUR

EMMANUEL BIGAND
professeur de psychologie cognitive, directeur du laboratoire d'étude et de l'apprentissage et du développement, à l'université de Bourgogne, à Dijon.

La ferveur commune ressentie par cette foule assistant à un concert a peut-être des origines profondes dans l'histoire évolutive de l'humanité.

d'un ordinateur qui traiterait froidement les informations du monde extérieur, l'auditeur est le plus souvent présenté comme un «analyseur» de signaux acoustiques mettant en œuvre des méthodes précises. On ne songe pas à s'intéresser à ses réactions sensibles ni à l'influence de ces réactions sur sa façon d'écouter la musique.

Il est vrai qu'il est plus facile de trouver des indicateurs comportementaux et neurophysiologiques des traitements de l'information qu'effectue le cerveau que de trouver des paramètres associés aux réactions émotionnelles. Ainsi, on mesure des temps de réponse, on analyse des mouvements oculaires, on enregistre une activité cérébrale, mais on n'a pas identifié de paramètres fiables de mesure des réactions émotionnelles. Autrement dit, en quoi les paramètres «objectifs» nous renseignent-ils sur l'état émotionnel, sur le ressenti de l'auditeur?

Ces difficultés n'ont pas empêché la psychologie des émotions de se développer dans de nombreux domaines, mais elles ont longtemps paru insurmontables dans le cas de la musique. Contrairement à certains sons qui peuvent évoquer un danger (un sifflement de serpent, un aboiement de chien...), la musique n'a pas de conséquences immédiates: la survie d'un individu ne dépend pas de sa sensibilité à la musique. Nous écoutons de la musique pour le plaisir qu'elle nous procure, mais ce plaisir est libre de prendre des formes variées, lesquelles dépendent seulement du vécu de l'auditeur et de son état au moment de l'écoute. La situation a changé!

Aujourd'hui, les émotions musicales sont au cœur de nombreuses recherches. Les résultats obtenus sont souvent surprenants et contribuent à mieux comprendre la place de la musique dans les sociétés humaines. Plusieurs idées reçues ont ainsi été remises en question. C'est par exemple le cas de celle voulant que les réponses émotionnelles à la musique soient uniquement subjectives.

DES ÉMOTIONS COMMUNES

Certes, les émotions suscitées par certaines œuvres peuvent être déterminées par des éléments non musicaux, par exemple des événements associés «accidentellement» à l'œuvre. Ainsi, telle œuvre évoquera la tristesse pour une personne, car elle est associée à la disparition d'un être cher, et à la gaieté pour une autre parce qu'elle évoque la rencontre de l'être aimé. Ces associations émotionnelles extramusicales existent, mais ne représentent qu'une part minime de nos expériences. Si l'émotion dépendait uniquement des contextes d'écoute, une œuvre donnée évoquerait autant d'expressions différentes qu'il y a d'auditeurs et chacun en aurait une expérience particulière. Lors d'un concert, son voisin de droite pleurerait, tandis que celui de gauche se délecterait joyeusement de la soirée. Or il est évident que cela ne se produit jamais. Les œuvres musicales ont une structure expressive suffisamment puissante pour imposer des états émotionnels communs à un grand nombre d'auditeurs. La musique peut mettre à l'unisson émotionnel une foule entière.

Ce pouvoir lui confère une force de cohésion sociale essentielle dans la plupart des cultures du monde. Il s'exerce déjà chez le nourrisson par l'intermédiaire des comptines qui lui sont chantées. Le bébé est d'ailleurs plus fasciné par la voix de sa mère quand elle chante que quand elle parle. Le choix approprié des comptines permet de moduler ses états émotionnels, et il existe manifestement des universaux expressifs puisque les comptines du monde entier partagent de nombreux traits structuraux (*voir La musique est-elle universelle?, par B. Tillmann, page 16*).

La fonction de cohésion sociale s'exerce ensuite tout au long de la vie, et plus particulièrement au moment de l'adolescence. À ce stade, la musique traduit les états émotionnels traversés par les adolescents, ce qui facilite les regroupements par affinité. Les réponses émotionnelles à la musique sont également plus stables que l'on pouvait imaginer pour un auditeur donné. L'émotion que procure une œuvre diffère sans doute d'un jour à l'autre, en fonction de l'humeur et du contexte, et elle évolue tout au long de la vie. Une telle variété est souhaitable, sinon l'expérience musicale deviendrait très vite répétitive.

Toutefois, ces variations restent centrées autour d'une même expérience émotionnelle. S'il n'en était ainsi, choisir un disque dans sa discothèque relèverait plus du jeu de hasard que d'un choix volontaire. Or il est rare que nous fassions de nombreux essais avant de trouver le morceau qui correspond à l'émotion recherchée. Lorsque

UN BÉBÉ PRÉFÈRE LA VOIX DE SA MÈRE QUAND ELLE CHANTE PLUTÔT QUE QUAND ELLE PARLE.

© Fotokannate LLC / Shutterstock.com

La musique active les mêmes régions cérébrales que les signaux liés à la nourriture, au sexe et à certaines drogues.

nous connaissons bien une base de données musicales, nous savons très précisément quel type de musique s'ajuste le mieux à l'état psychologique du moment. Ce savoir n'est possible que dans la mesure où les émotions musicales obéissent à des régularités.

Les recherches ont confirmé la stabilité des réponses émotionnelles. Lorsque l'on utilise des œuvres connues et bien caractérisées du point de vue expressif qui évoquent des émotions de gaieté («Le Printemps» des *Quatre saisons*, de Vivaldi), de colère ou de peur (*La Nuit sur le mont Chauve*, de Moussorgski), de tristesse (l'*Adagio* d'Albinoni) et dans une moindre mesure de sérénité, les réponses sont très reproductibles d'un auditeur à l'autre. Cette régularité est mise en évidence lors d'études où l'on demande à des auditeurs d'écouter des pièces qu'ils ne connaissent pas et d'exprimer leurs émotions.

Dans l'une de ces expériences, nous avons demandé à des auditeurs musiciens et non musiciens d'écouter vingt-sept extraits musicaux et de regrouper ceux qui exprimaient des émotions similaires. On ne leur demandait pas d'exprimer un jugement verbal. L'analyse de ces groupements permet de définir une distance émotionnelle entre les œuvres: si deux œuvres ne sont jamais regroupées, c'est qu'elles déclenchent des émotions très différentes, et que leur distance émotionnelle est importante.

Qui plus est, dans ce type d'expériences, les distances émotionnelles évaluées à partir des réponses sont quasi identiques lorsque les auditeurs refont l'expérience trois semaines plus tard. Plus surprenant encore, ces distances sont très similaires pour des groupes d'auditeurs différents et elles ne changent presque pas avec l'expertise musicale (que le sujet soit familier ou non de la musique).

Suzanne Filipic et Philippe Lalitte, dans notre laboratoire, ont exposé des auditeurs n'ayant pas de formation musicale et des instrumentistes spécialistes de musique contemporaine à des œuvres de ce type de musique. Ils ont comparé leurs réactions émotionnelles (tristesse, gaieté, anxiété, etc.) et, malgré les différences de sensibilité, ils ont observé des résultats tout à fait comparables: les émotions sont similaires.

ÉMOTIONS PERÇUES, ÉMOTIONS VÉCUES

Les émotions perçues sont-elles réellement vécues? Autrement dit, les auditeurs identifiant bien les émotions exprimées par les œuvres les ressentent-ils vraiment? Les auditeurs pourraient identifier les mêmes émotions sans pour autant les ressentir de la même façon. Cette différence entre émotions «perçues» et émotions «vécues» reste un sujet de débat. Pour certains, on peut reconnaître le caractère triste d'une musique que l'on écoute sans devenir triste ni même ressentir la moindre tristesse. De même, il est possible de voir des personnes tristes, tout en étant gai soi-même.

Toutefois, de tels décalages – de telles dissociations – ont leurs limites, c'est-à-dire qu'ils sont normalement de courte durée, sauf dans des cas pathologiques ou dans un contexte expérimental. Antonio Damasio, à l'université de Californie, à Los Angeles, a montré que les patients qui ne sont plus capables d'identifier les émotions (des émotions perçues) à la suite d'une lésion cérébrale ne ressentent en général plus d'émotions (des émotions vécues) non plus.

Par ailleurs, Paula Niedenthal et ses collègues de l'université Blaise-Pascal, à Clermont-Ferrand, ont empêché des sujets de ressentir l'émotion qu'ils devaient identifier en utilisant un artifice expérimental approprié: ils forçaient le sujet à rire (en projetant, par exemple, une image humoristique) alors même qu'ils lui présentaient un visage triste et lui demandaient de préciser quelle émotion traduisait le visage. Ils ont ainsi montré que le sujet éprouve plus de difficultés à identifier l'émotion du visage lorsqu'il est perturbé. Dans un contexte naturel, l'émotion identifiée dans une œuvre ne reste pas longtemps dissociée de l'émotion ressentie: si l'écoute d'une musique triste pendant quelques minutes ne nous rend pas tristes, celle de musiques sinistres pendant une heure influe sur notre état d'esprit, même si nous étions joviaux au début.

On peut donc admettre que l'émotion identifiée est liée à l'émotion ressentie. Une expérience le met en évidence: on demande à des sujets d'évaluer le caractère émotionnel de stimulus non musicaux, qui n'évoquent pas d'émotions particulières (tels que des lettres

chinoises sans signification pour un sujet occidental). On fait précéder la projection du stimulus par un extrait musical auquel le sujet n'est pas invité à prêter attention, mais qui est soit gai, soit triste. On demande ensuite au sujet de dire s'il trouve le dessin projeté (théoriquement neutre) gai, triste ou neutre. On constate que le caractère émotionnel attribué au stimulus neutre est influencé par l'émotion déclenchée par le morceau qui précède. Un tel effet est qualifié d'amorçage affectif et suggère que la musique modifie l'état affectif du sujet, ce qui le conduit à projeter l'émotion musicale ressentie sur le stimulus neutre. Dans ce type d'études, l'émotion musicale influe sur le comportement du sujet sans qu'il n'ait à exprimer ce qu'il a ressenti.

SEXE, DROGUE ET MUSIQUE

L'analyse des réponses physiologiques à la musique constitue un moyen supplémentaire pour s'assurer que les émotions musicales sont bien «vécues». Nos émotions sont suffisamment fortes pour entraîner de nombreuses modifications physiologiques, telles que le rythme cardiaque, le rythme respiratoire ou encore la conductance de la peau (une émotion fait transpirer, ce qui modifie la capacité que présente la peau de conduire un infime courant électrique). Le frisson dans le dos ou la chair de poule mentionné au début seraient une traduction physiologique spécifique (mais non exclusive) de l'émotion musicale.

L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, IRMf, confirme l'implication des réseaux neuronaux émotionnels quand on écoute de la musique. Ann Blood et Robert Zatorre, de l'université McGill, au Canada, ont demandé à des auditeurs volontaires d'écouter dans un scanner les musiques qui leur procurent habituellement de fortes émotions. Ils ont constaté que la musique active les mêmes régions cérébrales que les stimulus ayant une forte implication biologique, tels que la nourriture et les stimulations sexuelles (et aussi certaines drogues).

Les résultats obtenus en imagerie cérébrale suggèrent que des liens anatomiques et fonctionnels se sont créés entre les systèmes cérébraux anciens (liés aux émotions) et les régions corticales (plus récentes et liées au raisonnement et autres processus cognitifs supérieurs). C'est ce qui nous permet de ressentir des émotions en présence de stimulus abstraits et culturels, notamment la musique. Les stimulations les plus intenses sont provoquées par des musiques généralement qualifiées de tristes ou mélancoliques.

Eckart Altenmüller, de l'Institut de musique de Hanovre, a cherché à identifier la signature électrophysiologique des «frissons dans le dos». En présentant des extraits du *Requiem* de Mozart à des auditeurs allongés dans un scanner, il a associé cette émotion à des passages précis de l'œuvre. L'analyse des indices électrophysiologiques montre que la musique ne provoque pas simplement des sentiments abstraits, mais qu'elle déclenche des changements d'activité au cœur même du cerveau.

Certaines émotions semblent plus fréquemment associées à des modifications physiologiques spécifiques. Selon Carol Krumhansl, de l'université Cornell, aux États-Unis, la gaieté entraînerait une accélération du rythme respiratoire et une respiration plus profonde, alors que la tristesse se manifesterait par des changements du rythme cardiaque, par une augmentation de la pression sanguine et une diminution de la conductance de la peau.

D'autres études d'imagerie cérébrale

LES CHANTEURS D'OPERA (ici, *La Flûte enchantée*, de Mozart) accentuent les émotions véhiculées par la musique en «jouant» la comédie. Costumes, mise en scène, expressions et jeux des comédiens permettent aux spectateurs de percevoir encore mieux si l'émotion associée à la musique est la gaieté, la tristesse ou l'inquiétude.

© Robbie Jack / GettyImages

suggèrent que les deux hémisphères ne contribueraient pas de façon identique aux émotions musicales : l'hémisphère gauche semble plus actif lors de l'écoute de musique gaie, et l'hémisphère droit, lors de l'écoute de musique triste. Toutefois, même si l'imagerie cérébrale nous permet de localiser les aires impliquées dans l'émotion musicale, et la chorégraphie de leur activation, cela ne nous suffit pas pour comprendre comment naît une expérience émotionnelle et en quoi elle consiste. Dès lors, il faut avoir recours à la psychologie expérimentale.

Quatre grandes catégories d'émotions semblent prédominer en musique : la gaieté, la colère (ou la peur), la tristesse et la sérénité, qui seraient identifiées sans difficulté dès l'âge de cinq ans. La musique peut-elle déclencher des émotions plus subtiles ? Tout mélomane sera tenté de répondre oui, et l'on pourrait même penser que la musique suscite des émotions spécifiques – mais cela n'est pas démontré. En 2005, en collaboration avec l'équipe de Stephen McAdams, de l'Ircam, nous avons voulu tester diverses méthodes pour approfondir cette question. Une des méthodes, déjà évoquée, consiste à présenter sur un écran d'ordinateur un ensemble de vingt-sept extraits musicaux, suffisamment longs pour installer un climat expressif précis, et suffisamment courts pour que ce climat reste stable tout au long de l'extrait.

Ces extraits étaient choisis en collaboration avec le musicologue François Madurell, à Sorbonne-Université, à Paris, pour représenter une large variété de styles musicaux, de formations instrumentales et d'expressions. Le dispositif expérimental permettait aux sujets d'écouter ces extraits autant de fois qu'ils le voulaient ; ils devaient ensuite grouper par deux, trois ou davantage ceux qui, selon eux, évoquaient une même émotion. Une fois réalisée avec un nombre suffisant de sujets, l'expérience fournissait une matrice de co-occurrence, qui indiquait combien de fois tel ou tel morceau avait déclenché la même émotion. C'est une matrice dite de proximité émotionnelle des extraits.

DES ÉMOTIONS EN TROIS DIMENSIONS

Cette démarche est facile à réaliser, plaisante pour les sujets, et n'exige pas de formuler ses émotions. Elle permet d'identifier les dimensions psychologiques qui organisent les distances émotionnelles entre les différents extraits. Si, par exemple, la matrice contenait les distances en kilomètres séparant différentes villes de France (à la place des morceaux de musique), l'analyse statistique permettrait d'extraire les dimensions physiques qui structurent l'espace des distances entre les villes. Trois dimensions seraient nécessaires, correspondant aux axes nord-sud, est-ouest, et à l'altitude. De même, l'analyse des matrices émotionnelles permet d'isoler les dimensions psychologiques qui structurent l'espace de nos émotions musicales. Trois dimensions principales ont été observées : l'axe de l'énergie des émotions ressenties, l'axe de valence émotionnelle et l'axe de la dynamique (*voir ci-contre*).

L'axe de l'énergie des émotions ressenties va des émotions de grande énergie, intenses (gaieté, colère) à des émotions de faible énergie, reposantes (dépression, sérénité). Le second axe oppose des émotions positives (gaieté ou sérénité) aux émotions négatives (colère ou désespoir). Cet axe ne retrace pas le caractère agréable, généralement rapporté dans les études sur les émotions. En effet, l'une des spécificités de la musique est de pouvoir être jugée plaisante même si l'émotion induite est triste, c'est-à-dire même si elle a une valence négative. Enfin, nous avons pu dégager un dernier axe qui est lié au mouvement corporel induit par la musique, l'axe de l'émotion corporelle ou corporalité.

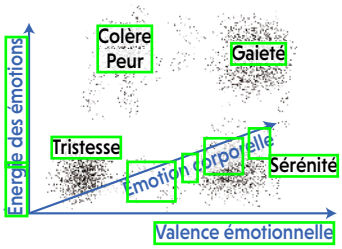
Comme l'avait noté le psychologue Robert Francès dès 1956, la musique réveille des schémas sensorimoteurs qui renforcent l'expérience affective du sujet : il y a une interaction entre les schémas purement cognitifs, l'affect et le corps. L'émotion ressentie par l'auditeur active des schémas moteurs – des mouvements – mémorisés qui, en retour, agissent sur la perception de la musique écoutée. Autrement dit, cette troisième dimension indique que nos émotions musicales ne sont pas purement intellectuelles : elles puisent dans l'ensemble des affects liés aux expériences corporelles que le sujet a déjà vécues. Dans notre étude, cette dimension de l'espace oppose des œuvres dont le processus musical est continu (par la forme de la courbe mélodique, le rythme, ou le type de progression harmonique) à des œuvres dont les processus sont plus fragmentés (arpèges brisés, rythme irrégulier, modulations subites).

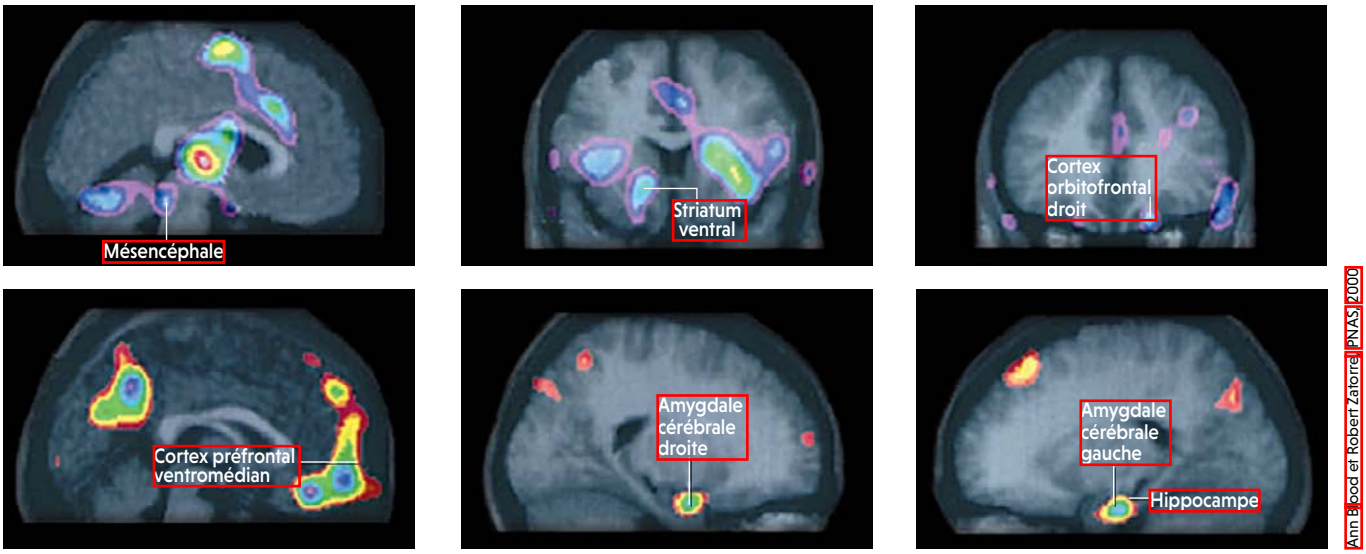
Les œuvres que nous écoutons engendrent des émotions qui prennent des positions spécifiques sur ces dimensions d'énergie, de valence et de corporalité, en fonction de leurs caractéristiques structurelles. Ces dimensions étant continues, il y a une infinité de façons de combiner ces valeurs, laissant ainsi place à un nombre quasi infini d'émotions subtilement différentes. Cette approche rend mieux compte de la complexité et de la richesse des émotions en musique qu'une approche sous forme de catégories.

Les quatre grands types d'émotions (gaieté, désespoir, sérénité, colère) existent bien, mais ils ne représentent qu'un tout petit aspect de nos émotions. Les pièces musicales « gaies » déclenchent des émotions de grande dynamique et de forte positivité qui sont localisées en haut et à droite de cet espace. Selon que ces pièces ont ou non un caractère dansant (émotion corporelle plus ou moins élevée), elles ont une place différente sur le troisième axe. Les >

DES EXTRAITS MUSICAUX

sont diffusés à des sujets qui doivent dire s'ils les trouvent gais, tristes, sereins ou inquiétants. L'analyse des résultats montre qu'on peut les décomposer selon trois paramètres : la valence émotionnelle, l'émotion corporelle (ou corporalité) et l'énergie. On constate que les extraits sont regroupés en quatre zones que l'on associe à la tristesse (valence négative, corporalité faible et énergie faible), la sérénité (valence positive, corporalité faible et énergie faible), la gaieté (valence positive, corporalité élevée et énergie élevée) et la colère ou la peur (valence négative, corporalité élevée et énergie élevée).





Ann Blood et Robert Zatorre, PNAS, 2000

L'IMAGERIE CÉRÉBRALE révèle les aires activées par différents types de musiques (ici, très plaisante). Le débit sanguin augmente dans le mésencéphale, le striatum et le cortex orbitofrontal droit. Il décroît dans le cortex préfrontal ventromédian, l'amygdale cérébrale et l'hippocampe.

pièces colériques suscitent des émotions de forte énergie, mais de valence négative. De même, les pièces tristes ou dépressives se situent dans la région de l'espace émotionnel où la dynamique est faible et la valence négative. Les pièces sereines, telles que les comptines pour enfants, engendrent des émotions de faible dynamique et de valence positive. Cette représentation laisse transparaître la richesse possible des émotions induites par la musique.

UNE PARTITION DANS LA TÊTE

Toutefois, le problème reste entier: comment déterminer ce qui, dans les œuvres, module l'intensité de nos émotions sur chacun de ces axes? Cette question est à l'intersection de la musicologie, de la psychologie et des neurosciences cognitives. La psychologie isole les traits musicaux porteurs d'expression, les neurosciences cognitives observent comment ces traits affectent l'auditeur. La musique étant un objet de culture, certains éléments ne seront jugés expressifs que par les membres de telle ou telle culture.

Ainsi tout un ensemble d'organisations musicales liées à la tonalité a un pouvoir expressif qui peut être confirmé par des méthodes directes auprès d'auditeurs occidentaux (on demande au sujet d'indiquer quel passage dans un extrait musical lui semble le plus expressif par exemple), ou indirectes (on mesure les modifications physiologiques de l'auditeur qui écoute un trait spécifique). On peut ainsi constater qu'une modulation, c'est-à-dire le passage d'un ton à un autre (de la gamme de *do* à la gamme de *sol*) ou d'un mode à un autre (majeur à mineur) et surtout la vitesse à laquelle cette modulation est réalisée provoquent des réponses émotionnelles.

C'est ce qui a été vérifié lors d'une étude conduite à l'hôpital La Timone, à Marseille, en collaboration avec Catherine Liégeois-Chauvel, Stéphanie Khalfa, Michel Paindavoine et Charles Delbé. Nous avons enregistré en temps réel, dans différentes aires cérébrales, les réponses émotionnelles d'auditeurs à différents types de musiques très contrastées. Nous avons constaté que, chez certains d'entre eux, la puissance du signal électrophysiologique change en synchronie avec les structures musicales qu'ils écoutent. Par exemple, dans le cas d'une fugue, chaque entrée de voix entraîne une modification de la puissance du signal enregistré dans la quasi-totalité des structures cérébrales.

Les changements sont parfaitement synchronisés avec la structure musicale. Pour certains de ces auditeurs (qui n'étaient pas des musiciens), le signal électrophysiologique prenait des allures de partition musicale!

D'autres changements ont des effets sur les émotions et ce quelle que soit la culture. Ainsi, Simone Dalla Bella et Isabelle Peretz, de l'université de Montréal, au Canada, ont montré que les changements de mode et de tempo ont des effets systématiques sur la valence émotionnelle des morceaux et que ces effets sont perceptibles dans plusieurs cultures. Il ne s'agit bien sûr pas de prétendre que les musiques en mode majeur sont systématiquement perçues comme plus gaies que les musiques en mode mineur, mais un même morceau semblera plus gai lorsqu'il est joué en mode majeur plutôt qu'en mode mineur.

De même, un morceau donné semblera plus gai lorsque son tempo augmente. Le mode et le tempo constituent deux caractéristiques musicales essentielles pour faire varier les émotions selon les dimensions de valence émotionnelle et de dynamique. D'autres paramètres liés aux multiples qualités acoustiques des sons contribuent également à faire varier l'expression des extraits musicaux. La sérénité et la douceur sont généralement déclenchées par des sons joués à faible amplitude, avec des harmonies très

consonantes, des timbres acoustiquement pauvres, des articulations très liées et des rythmes réguliers. La colère sera plus facilement évoquée par des sons détachés, puissants, ayant des enveloppes d'amplitude instable, des spectres harmoniques très riches, des harmonies dissonantes et des rythmes et tempos irréguliers. Il est évident que la façon dont ces différents aspects du langage musical occidental (modulation, tonalité, ornements…) sont combinés au sein d'une œuvre avec les autres paramètres sonores offre au compositeur une infinité de moyens de définir des structures sonores expressives.

L'œuvre musicale regorge donc d'éléments susceptibles d'émouvoir l'auditeur. Ces éléments peuvent être immédiatement perceptibles lorsqu'ils sont liés aux qualités des matériaux sonores ou, au contraire, ils peuvent nécessiter des traitements cognitifs complexes liés à l'analyse de la syntaxe musicale. Ainsi, il est possible que plusieurs processus émotionnels cohabitent à différentes échelles de temps lorsque nous écoutons une œuvre, certains étant immédiats, d'autres plus lents. Comprendre le décours temporel de ces processus constitue un autre aspect important des études actuelles.

Les premiers résultats sont surprenants. Dans la vie quotidienne, les réponses émotionnelles peuvent être extrêmement rapides, et même précéder l'analyse cognitive, ce qui est compréhensible lorsque les stimulus rencontrés ont une très forte implication biologique et adaptative (la vue d'un serpent déjà évoquée). En revanche, on pensait que les processus émotionnels en musique étaient plus lents. Ne dit-on pas qu'il faut « entrer » dans l'œuvre pour la ressentir ? Pourtant, les études révèlent le contraire. Isabelle Peretz et ses collègues ont montré qu'il suffit de 500 millisecondes de musique pour différencier des musiques gaies de musiques tristes. Toutefois, les musiques gaies étant généralement jouées à des tempos plus rapides que les musiques tristes, on s'est demandé si les sujets de l'étude n'avaient pas fondé leurs réponses sur les différences de rythmes, perceptibles en 500 millisecondes. Nous avons repris cette recherche en présentant les vingt-sept extraits de musique classique de l'expérience précédente, mais, à la différence de l'étude initiale, nous n'avons fait entendre que les 500 premières millisecondes des extraits. On demandait ensuite aux sujets de regrouper les extraits qui semblaient évoquer des émotions similaires.

Les résultats obtenus avec des extraits aussi courts sont très similaires à ceux obtenus avec des extraits de 20 secondes. Cela suggère que 500 millisecondes de musique suffisent pour que l'auditeur perçoive l'expression de la pièce. Dans une variante de cette étude, nous avons présenté des extraits de musique (classique ou populaire) dont nous savions par des études préalables qu'une moitié était jugée très expressive par les auditeurs et l'autre moitié comme relativement neutre. Nous avons cherché à savoir combien de millisecondes de musique étaient nécessaires pour que les auditeurs différencient ces deux catégories d'extraits. Les résultats indiquent que 250 millisecondes de musique suffisent pour que l'auditeur ait une intuition juste du caractère émotionnellement riche ou neutre de l'extrait musical qu'il écoute.

500 millisecondes suffisent pour distinguer une musique gaie d'une musique triste

DEUX VOIES POUR LES ÉMOTIONS

Ce résultat est important, car il indique que le cerveau humain répond émotionnellement aussi vite à la musique qu'à un stimulus biologiquement pertinent (une menace pour la vie de l'individu). Il suggère également qu'il y aurait, pour les émotions musicales, une voie très rapide essentiellement fondée sur les caractéristiques spectrales du son et une voie plus lente, qui analyserait les structures plus abstraites des œuvres. Il est bien sûr évident que l'émotion musicale change au fil de l'écoute et s'enrichit à mesure que l'œuvre se déploie.

L'ensemble de ces observations contribue à mieux comprendre la place que la musique revêt dans nos sociétés. Le fait que nos réponses émotionnelles à la musique soient aussi riches, reproductibles pour le même individu, mais aussi d'une personne à l'autre, rapides et si profondément enracinées dans notre cerveau, suggère que la musique a un statut bien spécifique pour l'espèce humaine, même si une vaste question reste ouverte : quelle est sa valeur adaptative ? Aurait-elle été sélectionnée en même temps que le langage, autre voie de communication universelle ? Ou bien parce qu'elle « adoucit les mœurs » et que les sociétés dont les membres étaient sensibles à la musique se sont davantage multipliées ? ■

BIBLIOGRAPHIE

E. BIGAND ET B. POULIN-CHARRONAT, ***Musical Pitch, Handbook of Music Cognition,*** **(*dir. I. Cross*), Oxford University Press, à paraître.**

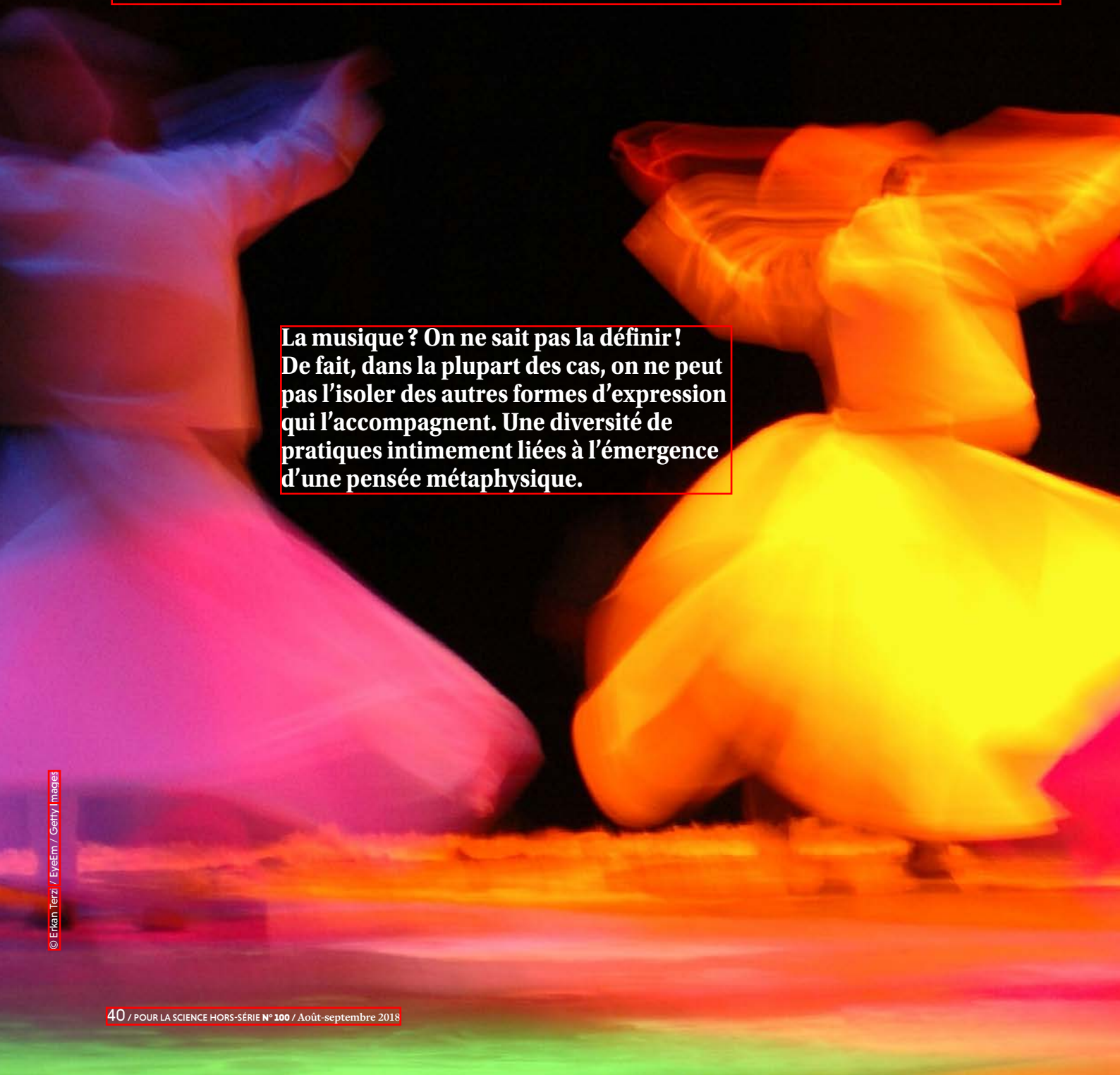
E. BIGAND ET S. FILIPIC, Cognition et émotions musicales, ***Intellectica,*** **vol. 48-49, pp. 37-50, 2008.**

E. BIGAND *ET AL.*, Multidimensional scaling of emotional responses to music: the effect of musical expertise and excerpts « duration », *Cognition & Emotion,* vol. 8, pp. 1113-1139, 2005.

S. MCADAMS ET E. BIGAND, ***Penser les sons*****, PUF, 1994.**

Un anthropologue au pays de la musique

La musique ? On ne sait pas la définir ! De fait, dans la plupart des cas, on ne peut pas l'isoler des autres formes d'expression qui l'accompagnent. Une diversité de pratiques intimement liées à l'émergence d'une pensée métaphysique.



© Erkan Terzi / EyeEm / Getty Images

L'ESSENTIEL

- Parmi tous les sons entendus, comment se distingue la musique ? La question est difficile et n'est pas tranchée.
- Le problème est encore plus délicat lorsqu'on s'intéresse à des musiques qui ne distinguent pas les « œuvres » de leurs contextes de performance.
- Certains ethnomusicologues en concluent que le concept de musique n'a pas une portée universelle.
- Selon d'autres, la musique est au contraire une capacité humaine partagée. Elle serait apparue au cours de l'évolution en lien avec la coopération voire avec la pensée métaphysique.

L'AUTEUR

VICTOR A. STOICHITA
est chercheur au Centre de recherche en ethnomusicologie (Crem-LESC/CNRS, université Paris-Nanterre)

Chez les soufis, les derviches tourneurs entrent en transe à l'écoute de certains sons. Est-ce de la musique ? Difficile de répondre tant la définition de ce mot est floue.

Mettez-vous dans la peau d'un anthropologue. Votre mission? Vivre au sein d'une population inconnue et comprendre ce qu'est la musique pour les individus que vous allez côtoyer. Vous voudriez savoir, par exemple, comment ils la jouent, comment ils l'apprécient, à quoi elle leur sert. La première étape serait de déterminer ce qu'est leur musique parmi toutes leurs autres activités sonores. Et là, les ennuis commencent...

UNE MUSIQUE OU PLUSIEURS?

Supposons que votre terrain d'enquête soit... la France. Vous ignorez ce que les Français nomment «musique», ou vous voulez leur laisser le soin de vous l'expliquer. Un dictionnaire, ou consulter un musicologue, seraient des solutions, mais vous êtes un scientifique de terrain! Les usages courants et populaires de cette notion vous intéressent au moins autant que ses définitions d'autorité. Au terme de votre enquête, croisant les points de vue de différents protagonistes, vous arriveriez alors probablement à une conclusion proche de celle de... Wikipedia. En France: «La musique est un art et une activité culturelle consistant à combiner sons et silences au cours du temps.» L'encyclopédie collaborative est bien, par construction, un mécanisme de matérialisation des consensus. Mais pourquoi cet étrange dédoublement: «un art et une activité culturelle»?

La suite de l'article ainsi que les nombreux échanges sur la page de discussion qui l'accompagne répondent: pour obtenir un relatif consensus, il a fallu ménager une place à deux conceptions de la musique au fond assez différentes. Selon la première, certains sons ou structures sonores seraient intrinsèquement musicaux. Ils cibleraient des structures innées et universelles de nos cerveaux (une préférence pour les sons harmonieux par exemple). Parler de musique, au singulier, serait alors possible. Selon une autre conception, non moins courante, la musique serait une construction culturelle dont la définition fluctue. La reconnaître et la comprendre nécessiteraient alors un apprentissage, et il vaudrait mieux dans ce cas parler de musiques, au pluriel.

En tant qu'anthropologue vous vous gardez bien de trancher. Vous observez simplement que ce que les Français nomment «musique» oscille, en pratique, entre ces deux conceptions. Une ethnographie plus détaillée indique aussi que ce consensus bipolaire s'érode sur ses marges. Comment qualifier le «son» des *free parties* et *teknivals* (celui de la veine *hardtek* par exemple, que même ses amateurs nomment juste «son» plutôt que «musique»)? Rapper, est-ce encore chanter? Les musiques dites «bruitistes» parviennent-elles à être en même temps musicales? Qu'en est-il des défis avant-gardistes comme le silencieux *4'33"* de John Cage? Sur toutes ses franges, le sens commun du mot «musique» tend à s'éparpiller en opinions contradictoires.

L'extension du concept de musique au monde animal soulève d'autres questions. Les oiseaux chantent-ils au même titre que les humains? En éthologie, la démonstration d'une «écoute hédonique» chez certaines espèces redonne du crédit à une hypothèse avancée par Darwin: aux côtés de la sélection naturelle, un «goût pour le Beau» pourrait jouer un rôle dans l'évolution des espèces. Il conduirait les femelles à préférer les mâles dont les atours, les parades et les vocalises leur procurent la plus grande jouissance esthétique.

Le sens commun du mot «musique» tend souvent à s'éparpiller en opinions contradictoires

En fin de compte, votre enquête conclurait probablement que la musique est, pour les Français, un type d'expérience auditive relativement singulier, dont la réalité ne fait aucun doute, mais dont les contours et la nature exacte restent pour eux quelque peu imprécis. Renfilez votre costume d'anthropologue et partez plus loin. Le problème devient vraiment aigu lorsque l'écart culturel se creuse et que les gens auxquels vous avez affaire ne distinguent, dans leur monde sonore, plus rien de comparable à ce que vous pourriez entendre par «musique».

LES LIMITES DE L'INTUITION

En Arménie par exemple, les kurdophones Yézidis vous diront qu'un «chant» (*stran*) est nécessairement joyeux. Ils désignent par ce mot des productions vocales ou instrumentales sous-tendues par une pulsation régulière. Celle-ci rend les «chants» d'emblée dansants et donc propices aux fêtes comme les mariages. Leurs paroles sont choisies avant tout pour leurs sonorités, et leurs significations importent peu.

Les Yézidis d'Arménie emploient une tout autre expression pour désigner les productions vocales ou instrumentales mélodisées qui n'ont pas de pulsation régulière. Ce sont des «paroles sur [quelque chose]»: paroles sur les morts

© Estelle Amy de la Bretèque

Pour les Yézidis d'Arménie, la musique est nécessairement joyeuse, sinon, ce n'est pas de la musique.

(*kilamê ser mirya*), paroles sur les héros (*kilamê ser mêranîê*), paroles sur l'exil (*kilamê ser xerîbîê*). Selon les circonstances, les «paroles sur» oscillent entre la lamentation, l'épopée et l'évocation de souvenirs nostalgiques, mais elles restent avant tout des «paroles».

En somme, résume Estelle Amy de la Bretèque, là où une oreille occidentale entendrait de la «musique», tantôt joyeuse, tantôt triste, l'oreille yézidie entend soit du chant (nécessairement gai), soit un récit mélodisé (au thème toujours empreint de mélancolie). Les instruments participent de cette dichotomie, avec le hautbois *zurna* qui «chante» dans les mariages tandis que le hautbois *duduk* «dit des paroles sur» dans les enterrements et en accompagnement des récits épiques. Sa sonorité douce et profonde renfermerait même, pour les Yézidis les plus poètes, l'ensemble des «paroles sur» qui pourront un jour être énoncées.

La présence ou l'absence de pulsation est un critère distinctif dans d'autres cultures sonores. Ainsi dans la forêt centrafricaine, les Pygmées Aka utilisent des formes complexes de «yodel» pour communiquer durant la chasse. Toutefois, explique l'ethnomusicologue Simha Arom, ils n'y voient de la musique que lorsqu'une pulsation régulière sous-tend la polyphonie. Gilbert Rouget souligne pour sa part que le yodel est un comportement vocal perceptuellement saillant auquel les Pygmées attribuent une capacité particulière à communiquer avec les esprits environnants. Que cette communication prenne la forme d'une «musique» pulsée (au village) ou de cris dans la forêt (domaine par excellence des esprits) serait peut-être une question secondaire qui n'affecte pas fondamentalement la charge affective et symbolique dont ils investissent ce type de voix.

Ailleurs, les productions sonores sont indissociables du contexte et de la finalité de leur performance: on trouve ainsi des techniques sonores de guérison parmi d'autres pratiques thérapeutiques, des jeux sonores parmi d'autres activités ludiques, des invocations chantées parmi d'autres actions rituelles... Aucun concept vernaculaire ne regroupe ces activités au prétexte que toutes seraient «sonores» ou «musicales». Au contraire même, le maintien de certaines démarcations a parfois son importance.

Ainsi, dans une grande partie du monde musulman, les appels à la prière et les récitations du Coran ne sont pas des «chants», même s'ils peuvent faire l'objet d'un travail vocal approfondi et qu'ils sont couramment commentés en termes esthétiques. Ils échappent dès lors par définition aux suspicions et interdits qui entourent la musique selon certaines interprétations du texte sacré. L'ambiguïté est plus grande pour les pratiques dévotionnelles et curatives de la sphère «soufie», et notamment dans les confréries des derviches, des gnaouas... Elles sont tantôt admises par les autorités ecclésiastiques parmi les pratiques religieuses acceptables, tantôt réprouvées en raison du risque de perversion et d'enchantements fallacieux que la musique pourrait occasionner.

LE POUVOIR SOCIAL DE LA MUSIQUE

Partis étudier des pratiques «musicales», les ethnomusicologues reviennent ainsi souvent avec la conclusion que, décidément, celles-ci sont difficilement dissociables des interactions sociales qui leur donnent naissance. Plusieurs travaux ont d'ailleurs montré que l'anthropologie pouvait fort bien se passer du concept de «musique» pour interpréter la façon dont diverses sociétés construisent et interprètent leurs mondes sonores. Faut-il alors considérer cette notion comme un simple concept vernaculaire? Une catégorie que certaines sociétés font exister, mais qui n'aurait rien d'universel?

L'intuition qui prévaut, en neurosciences et dans une grande partie des sciences humaines est bien différente. La musique serait une faculté humaine partagée, au même titre que le langage par exemple. Mais alors, quels en sont les traits déterminants?

L'ethnomusicologie n'a eu de cesse de montrer que partout dans le monde, des «sons humainement organisés» pouvaient susciter de puissantes émotions, servir d'étendards identitaires, participer de la coordination d'un groupe, raviver des mémoires enfouies. Les neurosciences ont permis dans certains cas de préciser les mécanismes cérébraux impliqués.

Cependant, bien souvent, ces mécanismes ne concernent pas en propre la musique. On a montré par exemple que le «circuit de la >

récompense» était impliqué dans le plaisir et les émotions qu'un mélomane peut ressentir. Dans les faits, ce circuit s'active plus souvent quand des besoins «primaires» (nourriture, sexualité…) sont satisfaits. La musique ne fait que «recruter» les structures cérébrales correspondantes, et s'il s'agit de les cibler artificiellement les substances psychotropes sont bien plus efficaces! La musique a-t-elle alors une façon particulière d'agir sur nous?

La question se pose en fait pour toutes les fonctions auxquelles on la lie habituellement. Il ne fait aucun doute que la musique peut structurer des identités collectives et induire de puissants sentiments d'appartenance, mais on pourrait en dire autant d'une compétition sportive. On a montré à diverses reprises que la musique pouvait avoir des effets bénéfiques contre des maladies neurodégénératives.

Toutefois, en 2015, l'équipe de Séverine Samson, de l'université Charles-de-Gaulle, à Lille, a montré que cette efficacité n'est guère supérieure à celle d'ateliers de cuisine menés dans les mêmes conditions. L'amélioration de l'état des patients pourrait être due aux effets socialisants de ces activités, ces dernières mobilisant souvenirs et sensorialités, plus qu'à une efficacité de la musique en tant que telle. Une longue histoire nous pousse à attribuer aux sons des effets plus ou moins magiques, un biais culturel qui reste observable dans la façon dont nous surinterprétons couramment certains résultats expérimentaux.

VARIATIONS SUR UN MÊME THÈME

Mais est-ce vraiment un biais culturel? À défaut de penser universellement une «musique», les sociétés humaines isolent toutes certaines pratiques sonores au prétexte que celles-ci auraient des effets transformateurs particuliers et remarquables. Ils vont de l'«enchantement» des sens à la magie occulte en bonne et due forme, en passant par toutes les variantes des «ravissements» et «extases» esthétiques.

Les pratiques elles-mêmes diffèrent, mais lorsque des humains investissent ainsi les sons de la capacité de modifier leur monde, ils mobilisent peut-être une même faculté d'écoute. Les théories qui accompagnent ces pratiques «chargées» les font découler de révélations surnaturelles, affirment leur capacité à dialoguer avec des esprits, ou à exploiter un ordre du monde autrement caché.

Comme le remarque l'ethnomusicologue Bernd Brabec de Mori, de l'université de Graz, en Autriche, la propension à lier ainsi certains sons à des conjectures plus ou moins métaphysiques apparaît avec une régularité remarquable dans les sociétés du présent. Elle pourrait aussi être très ancienne.

En effet, si l'on envisage la musique comme une capacité liée à l'espèce, on peut se demander pour quelle raison elle existerait dans toutes les sociétés humaines, alors qu'elle semble si discrète dans le reste du monde animal. Dans une logique évolutionniste, plusieurs hypothèses ont été avancées pour répondre à cette question. La musique pourrait être apparue comme un «protolangage», une forme première d'expression qui se serait affinée ensuite pour aboutir à la communication verbale telle que nous la connaissons. Ou bien, à l'inverse, elle serait peut-être un «produit dérivé» de nos compétences linguistiques: une façon plaisante et détournée de les mobiliser (pour cibler par exemple le circuit des récompenses dopaminergiques), mais sans autre avantage adaptatif.

Une autre théorie part du constat que dans le monde présent, la musique est fréquemment une activité collective et qu'elle entraîne les participants dans une coordination motrice (la danse) ou émotionnelle (l'empathie). Cette forme de coopération aurait pu favoriser l'émergence dans les groupes protohumains de formes d'action collective inédites chez les autres espèces. Certes distinctes, ces hypothèses ont en commun de considérer que la musique serait apparue en lien avec les nécessités de la communication intraspécifique.

Une autre piste propose d'explorer les liens de la musique avec l'émergence d'une pensée métaphysique. De celle-ci découle en effet la nécessité de communiquer non plus avec les seuls humains, mais aussi avec d'autres ordres de réalité et d'autres êtres animés ou animables (animaux non humains, forces naturelles, divinités, ancêtres…). Pour qualifier notre faculté de musique, il faudrait alors s'intéresser moins aux sons eux-mêmes qu'à cette étrange façon de les écouter en y décelant des choses et des êtres qui échappent à nos habitudes familières.

Pour entendre de la musique, résume le philosophe britannique Roger Scruton, «il faut être capable d'entendre un ordre qui ne nous informe pas sur le monde physique, qui se tient à l'écart de l'enchaînement habituel des causes et des effets, et qui est irréductible aux réalités qui lui ont donné physiquement naissance».

Alors que nous passons le plus clair de notre temps à remonter des sons vers leurs causes physiques (une porte claque, la pluie tombe sur le toit, un merle chante dans

LA PROPENSION À LIER CERTAINS SONS À DES CONJECTURES MÉTAPHYSIQUES APPARAÎT DANS TOUTES LES SOCIÉTÉS

© 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 continûment 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 «obscurs»).

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.

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 posséderaient 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. ■

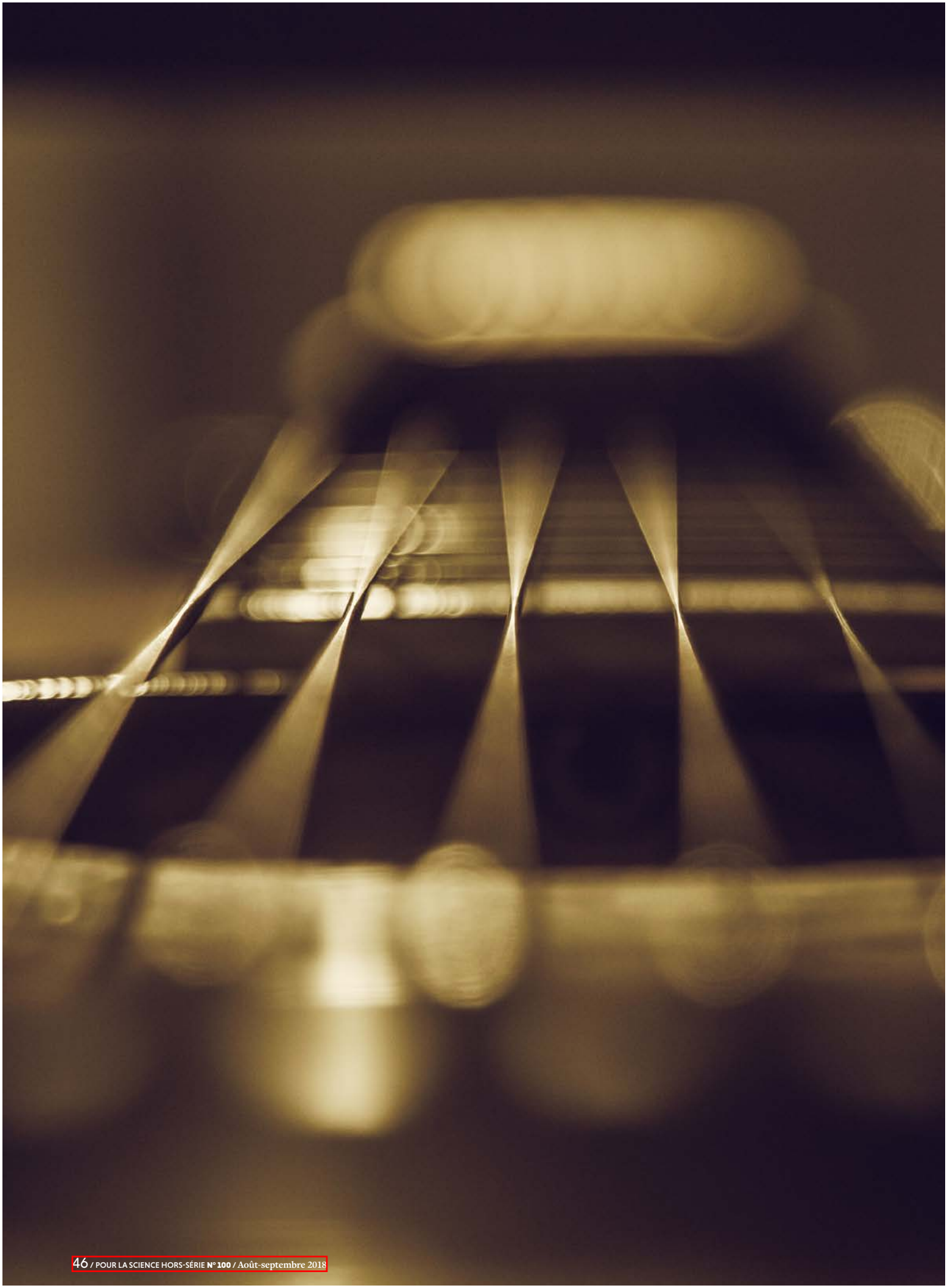
BIBLIOGRAPHIE

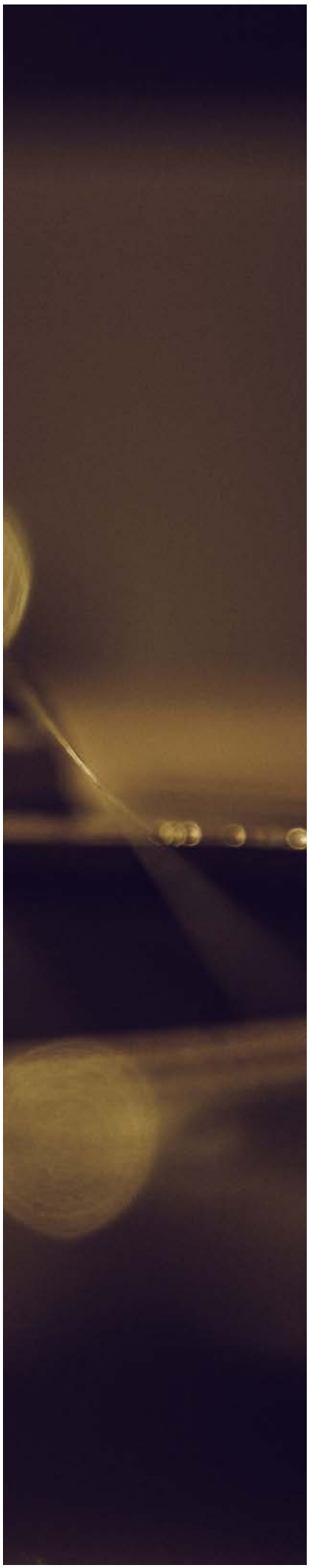
B. BRABEC DE MORI, Musical spirits and powerful voices : On the origins of song, *Yearbook for Traditional Music*, pp. 114-128, 2017.

J. DURING, Diaboli in mûsîqî. 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.





© David Trood / GettyImages

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.

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

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

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

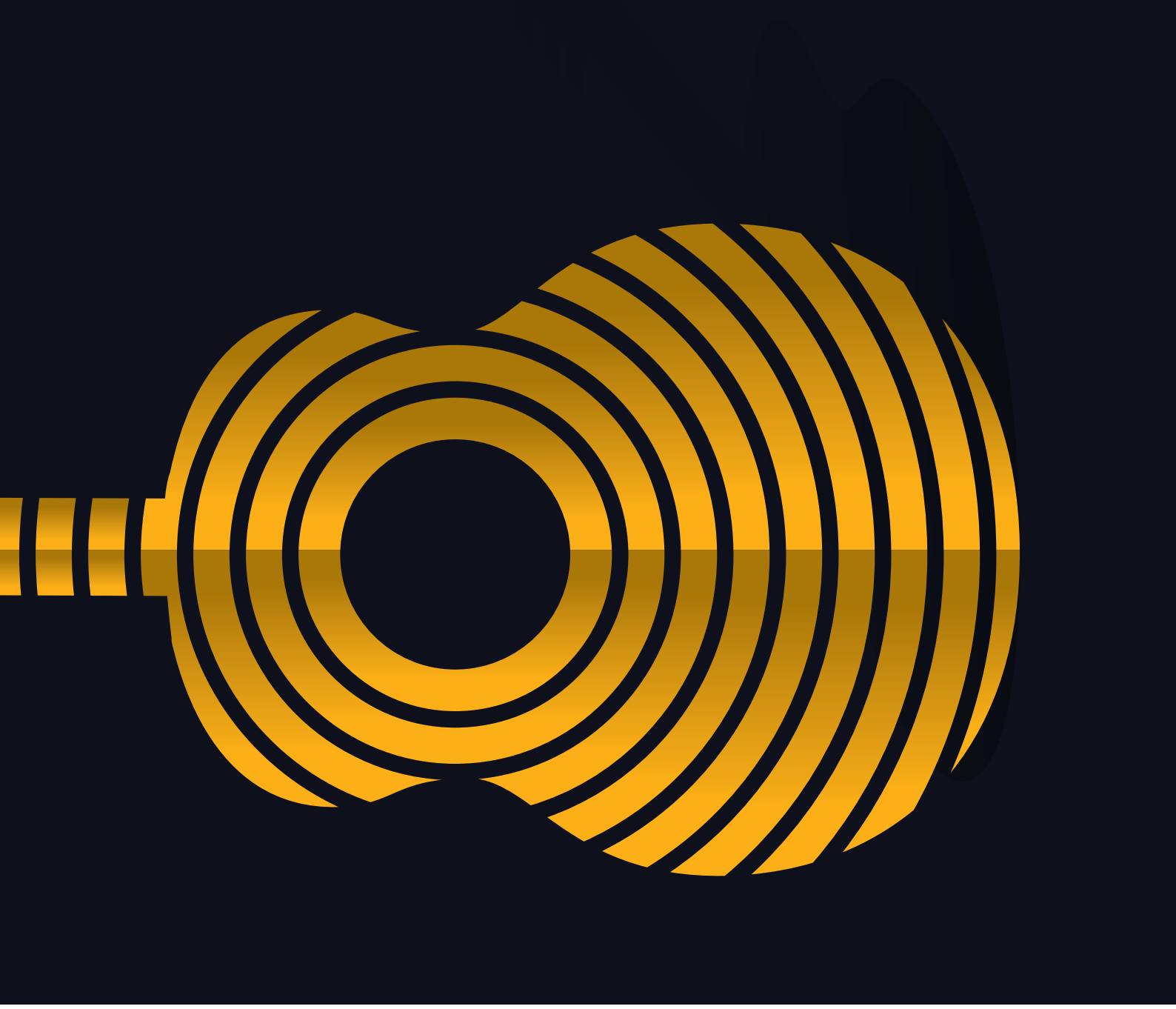
L'holographie au secours des luthiers

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.

Toc 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

© Shutterstock/Arak Rattanawijitakorn



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 XIXe 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

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.

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

Au XIXe 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 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 >

SAUPOUDRER LES VIBRATIONS

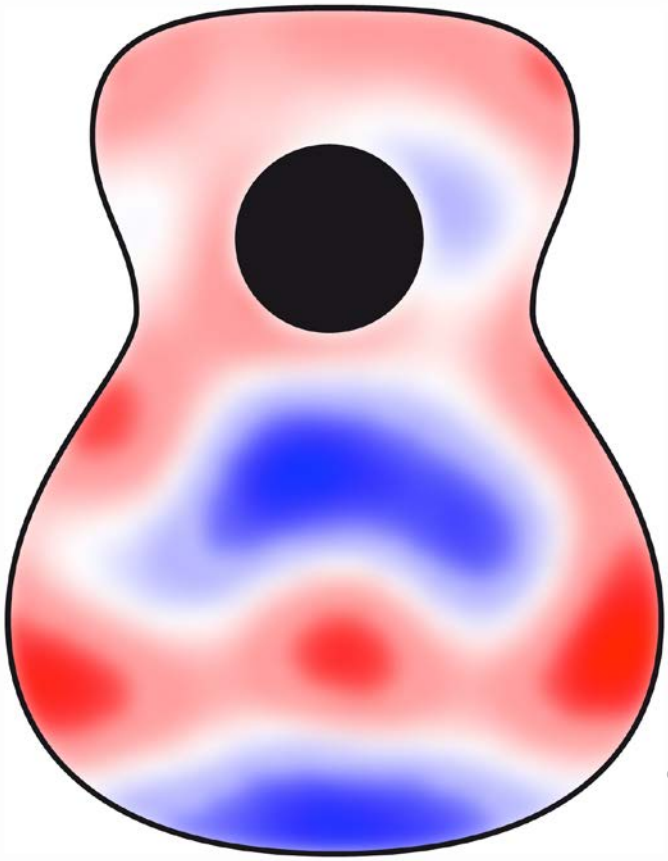
Le physicien allemand Ernst Chladni (1756-1827) a étudié les vibrations de plaques en les frottant avec un archet. Dans une version moderne de l'expérience, un haut-parleur crée les vibrations. Une poudre fine dispersée sur la plaque permet de les visualiser : elle se déplace et forme des motifs en se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

Omar Bergeal

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.

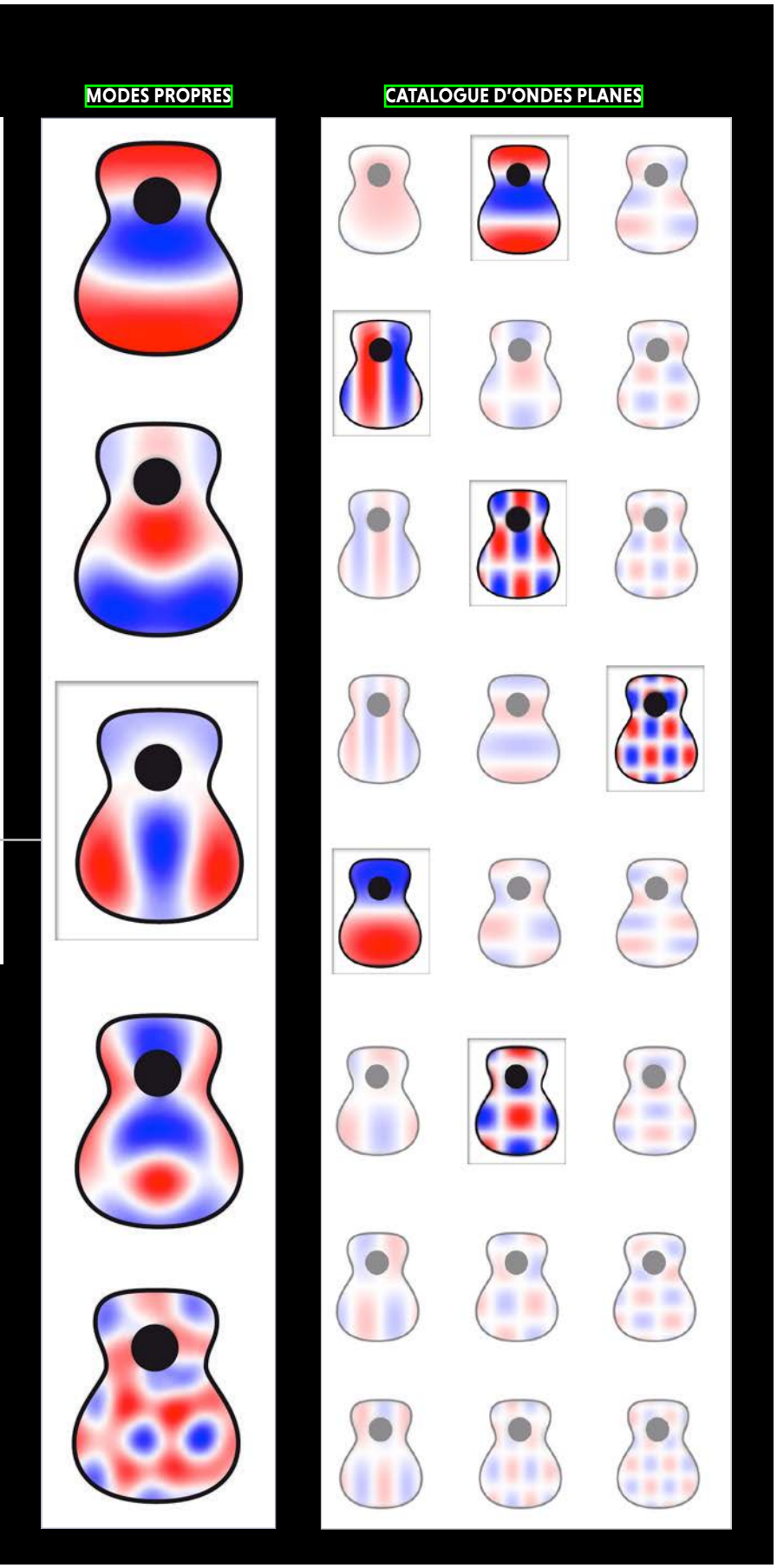
CARTE DES VIBRATIONS



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.

CHAQUE 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.



© Consortium du projet Echange

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

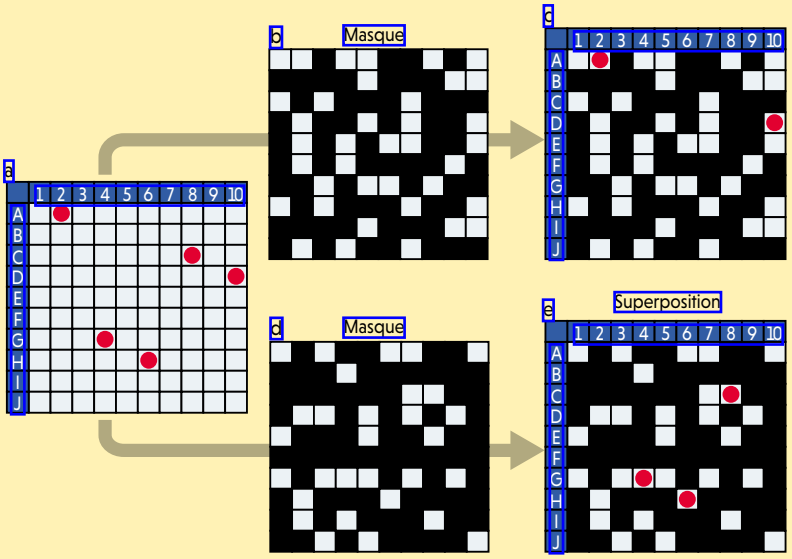
Reste une question : comment disposer les 120 microphones de l'antenne ? De façon un peu contre-intuitive, les algorithmes compressés fonctionnent mieux lorsque la répartition des microphones de l'antenne est irrégulière, ou bien lorsque la forme de la structure vibrante est elle-même complexe, comme 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

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 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.



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.

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.

CE MAGAZINE VOUS PLAÎT ?

OFFRE DURÉE LIBRE

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

2 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓
Le *Hors-Série* papier (4 numéros par an)	✓	✓
L'accès en ligne illimité www.pourlascience.fr		✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)		✓
L'édition numérique du *Hors-Série* (4 numéros par an)		✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996		✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**6,50 €** PAR MOIS	**8,20 €** PAR MOIS
VOTRE RÉDUCTION	**– 32 %**	**– 44 %**

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

☑ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique**

PAG18STDDOS

1 / JE CHOISIS MA FORMULE (merci de cocher) et je complète l'autorisation de prélèvement ci-dessous.

☐ FORMULE **INTÉGRALE**
- 12 nos du magazine papier
- 4 *Hors-Séries* papier
- Accès illimité aux contenus en ligne

8,20 € PAR MOIS – 44 % PV8E20

☐ FORMULE **PAPIER + HORS-SÉRIE**
- 12 nos du magazine papier
- 4 *Hors-Séries* papier

6,50 € PAR MOIS – 32 % PPV6E50

2 / MES COORDONNÉES

Nom : .....
Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal ⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌋ Ville : .....
Tél. : ⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌋
Email : (indispensable pour la formule intégrale)
..... @.....
J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

* Par mois et par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2018 en France métropolitaine. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter boutique.pourlascience.fr. Votre abonnement en prélèvement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour La Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : https://rebrand.ly/charte-donnees-pls Conformément à la réglementation applicable et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD » vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

3 / MANDAT DE PRÉLÈVEMENT SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de huit semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

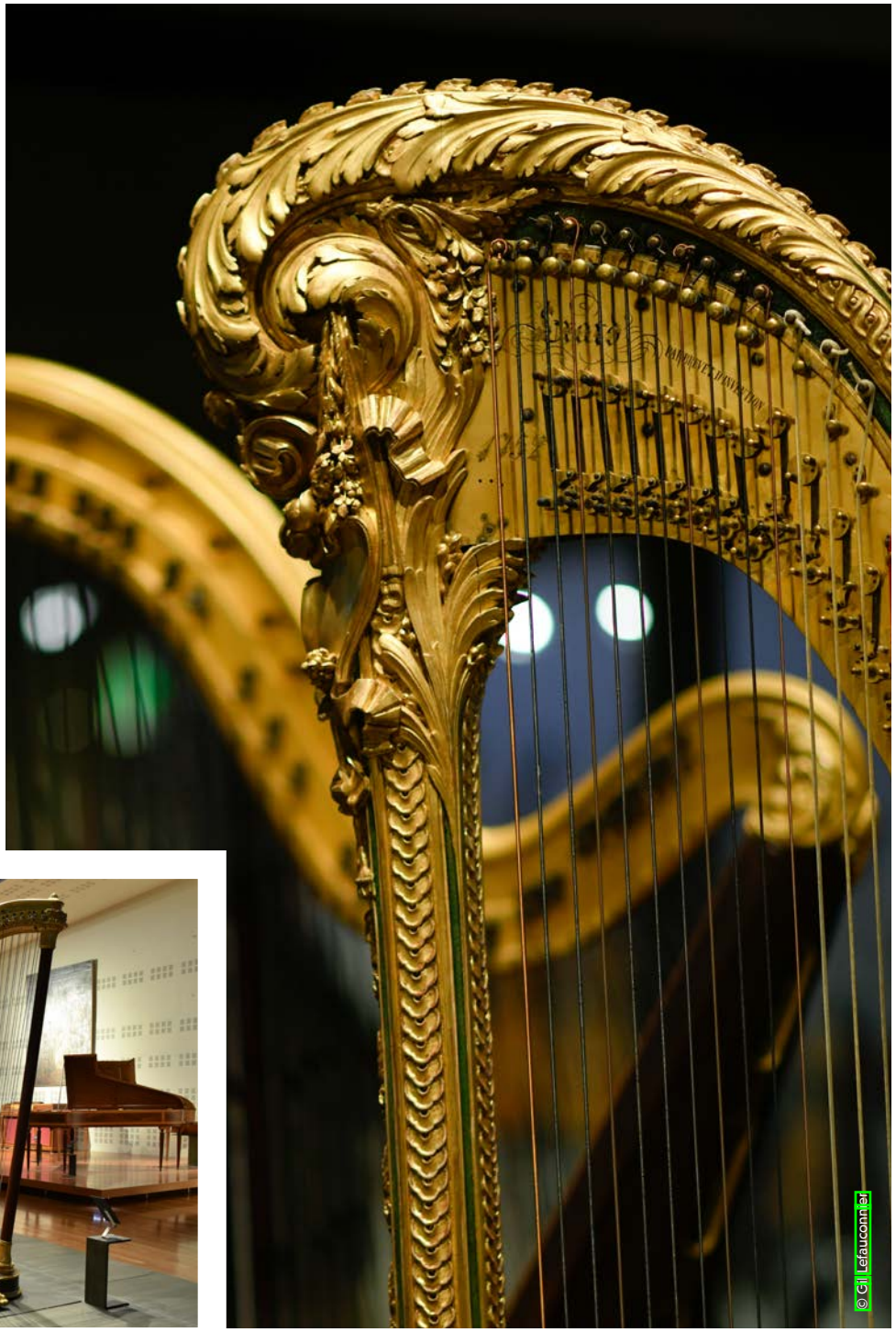
TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte
Nom : ..... Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal ⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌋ Ville : .....

Désignation du compte à débiter
BIC (Identification internationale de la banque) ⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊
IBAN ⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_

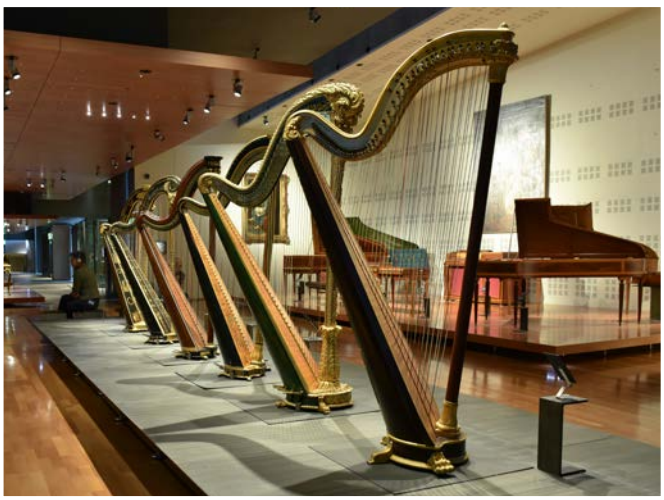
LES TRÉSORS DE LA MUSIQUE

L'histoire de la musique racontée en plus de 1 000 instruments. Telle est la vocation du musée de la Musique, au sein de la Philharmonie de Paris, qui fête cette année ses 20 ans. Morceaux choisis.



HARPE

Connue depuis l'Antiquité, la harpe évolue jusqu'au début du XIXe siècle. L'instrument est très en vogue dans l'aristocratie à la fin du XVIIIe siècle, les décors soignés en attestent *(ci-contre, une console de harpe Érard, Paris, 1873)*.



OCTOBASSE

Cet instrument gigantesque (de Jean-Baptiste Vuillaume, Paris, France, vers 1850) n'a pas un son beaucoup plus grave (une tierce en dessous) que celui d'une contrebasse. En revanche, ce son est beaucoup plus puissant. Présenté à l'Exposition universelle de 1855, il reçoit les éloges d'Hector Berlioz.

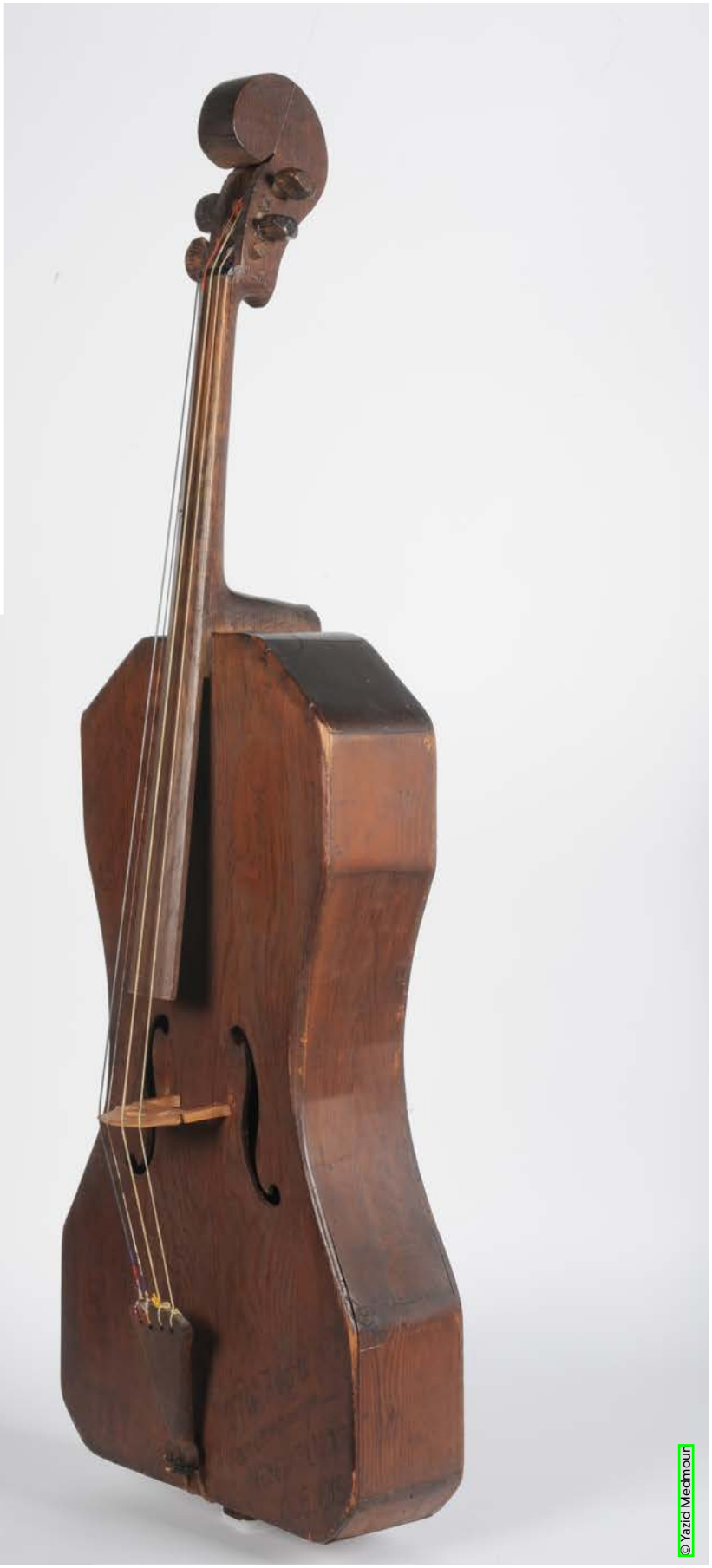
© Nicolas Borel

GUITARE

À la fin du XV^e^ siècle, la *vihuela de mano*, donne naissance à la guitare. Au XVI^e^ siècle, cette dernière colonise rapidement la France et l'Italie. Au XVII^e^ siècle, elle est montée de cinq paires de cordes, avec un dos plat *(ici, l'instrument de Jacques Dumesnil, Paris, 1648)* ou bombé comme le luth.

GUITARE ÉLECTRIQUE

La célèbre entreprise allemande Höfner produit sa première guitare électrique monobloc *(solidbody)* en 1956.
Le modèle 173 *(ci-dessous)*, commercialisé en 1962, emprunte sa forme et son circuit électronique à celle de la Fender Stratocaster.



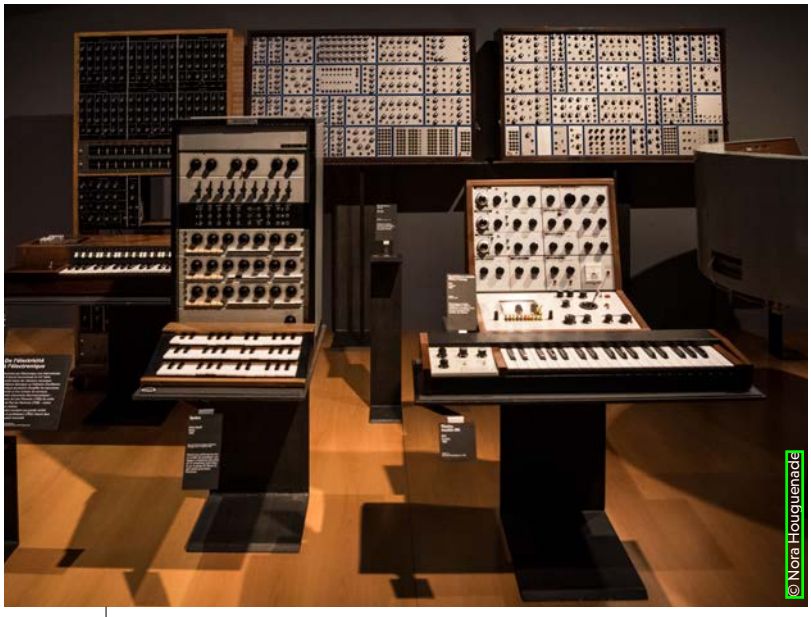
VIOLONCELLE

Témoignage emblématique de la Première Guerre mondiale, ce violoncelle dit le « Poilu » fut construit pour Maurice Maréchal *(photo en haut)* à partir de bois de caisses de munitions. Il a été signé par les généraux Foch, Gouraud, Joffre, Mangin et Pétain.

© Yazid Medmoun

CLAVECIN

Les plus anciens clavecins italiens (à un seul clavier) datent du XVIe siècle. Leur facture varie peu jusqu'au XVIIIe siècle. La caisse extérieure *(ci-dessus)* de celui-ci (Faby, Bologne, 1677) est peinte en faux marbre. Le clavier *(ci-contre)* est en ivoire gravé et en ébène incrusté.



LUTHERIE ÉLECTRONIQUE

Le synthétiseur Synket *(au premier plan)*, fabriqué à Rome en 1964, a appartenu au groupe de recherche musical Studio R7, dont faisait partie Ennio Morricone.
Les deux modules du synthétiseur E-mu *(au fond)* ont été spécialement développés pour Frank Zappa en 1976.

© Nicolas Borel

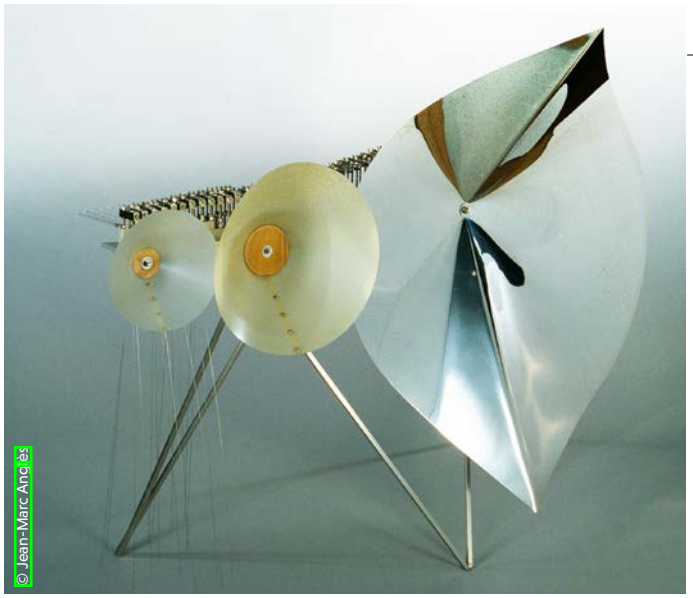
PIANOS À QUEUE

Ces instruments *(Érard, Paris, 1802 et 1812)* sont les premiers pianos de concert français. Leur succès dépasse largement les frontières de la France. Des compositeurs tels que Haydn et Beethoven ont possédé un modèle identique au piano à queue du premier plan.

© Nora Houguenade

ORCHESTRE «PIPHAT MON»

Ce type d'ensemble instrumental, essentiellement composé de gongs, de métallophones et de xylophones, est répandu en Asie du Sud-Est et en Indonésie. Cet orchestre thaïlandais *piphat mon* est plus spécifiquement dédié à la célébration de rites funéraires et se distingue par des instruments constitués d'une succession de petits gongs disposés sur des châssis verticaux en demi-lune. Somptueusement décoré et doré à la feuille, il a appartenu à une famille de musiciens professionnels.



© Jean-Marc Anglès

CRISTAL BASCHET

Mis au point dans les années 1950 par Bernard et François Baschet, l'instrument est constitué d'une rangée de 56 tiges de verre (couvrant 4 octaves et demie) encastrées dans une plaque de métal. Une grande feuille en acier inox conique pliée à la main et deux cônes en fibres de verre ainsi qu'un réseau de tiges métalliques servent d'amplificateurs. On joue en frottant ses doigts humides sur les baguettes de verre.

CITÉ DE LA MUSIQUE
PHILHARMONIE
DE PARIS

20 *ans*
MUSÉE
DE LA MUSIQUE

Des instruments de musique... virtuels

Comment créer des instruments de musique virtuels aux sonorités réalistes ? En modélisant les phénomènes physiques en jeu dans les vrais instruments et en utilisant des outils mathématiques et informatiques.

Pourquoi, lorsqu'on souffle plus fort dans une flûte, le son produit est non seulement plus fort, mais la note ou le timbre changent aussi ? Quelle est l'influence de la géométrie et du matériau sur l'instrument ? Pourquoi un musicien a-t-il besoin d'un apprentissage long et difficile pour donner de l'expressivité à son art ? De telles questions laissent entrevoir la complexité des phénomènes mis en jeu dans le fonctionnement des instruments de musique.

Cette complexité est à l'origine de ce qui rend le son de l'instrument naturel, unique et vivant. Mais elle n'a pas empêché les scientifiques de chercher à comprendre les instruments de musique et à reproduire électroniquement leurs sonorités. Les progrès réalisés sont tels qu'on sait aujourd'hui simuler sur ordinateur et piloter en temps réel des instruments de musique virtuels avec un rendu réaliste.

Dans l'histoire de la synthèse sonore, qui vise à créer des sons de façon artificielle (par voie électronique ou informatique), on peut distinguer deux types de procédés. Dans la « synthèse par modèles de signaux », on s'attache à construire directement le signal électrique à envoyer dans les haut-parleurs, pour obtenir des sonorités insolites qu'on trouve par exemple dans la musique dite électronique. La « synthèse par modèles physiques » s'intéresse, au contraire, au générateur de l'onde sonore, c'est-à-dire à l'instrument et à l'instrumentiste, plutôt qu'au son lui-même. Dans ce cas, qui fait l'objet du présent article, on veut mimer la réponse de l'instrument à tous les gestes possibles du musicien : attaques, transitoires entre notes, évolution du timbre avec la nuance.

DES INSTRUMENTS CHIMÉRIQUES

Quel est l'intérêt de la synthèse par modèles physiques ? Il est, bien sûr, de disposer de versions virtuelles et jouables d'instruments réels, anciens ou même disparus. Mais il est aussi de tester virtuellement des modifications de la géométrie et des matériaux de l'instrument, voire d'optimiser la puissance de celui-ci, sa brillance sonore... On peut également concevoir des instruments imaginaires ou farfelus, mais qui restent physiquement censés : des instruments de taille immense, un hautbois >

© Jan Gieselmann /shutterstock.com

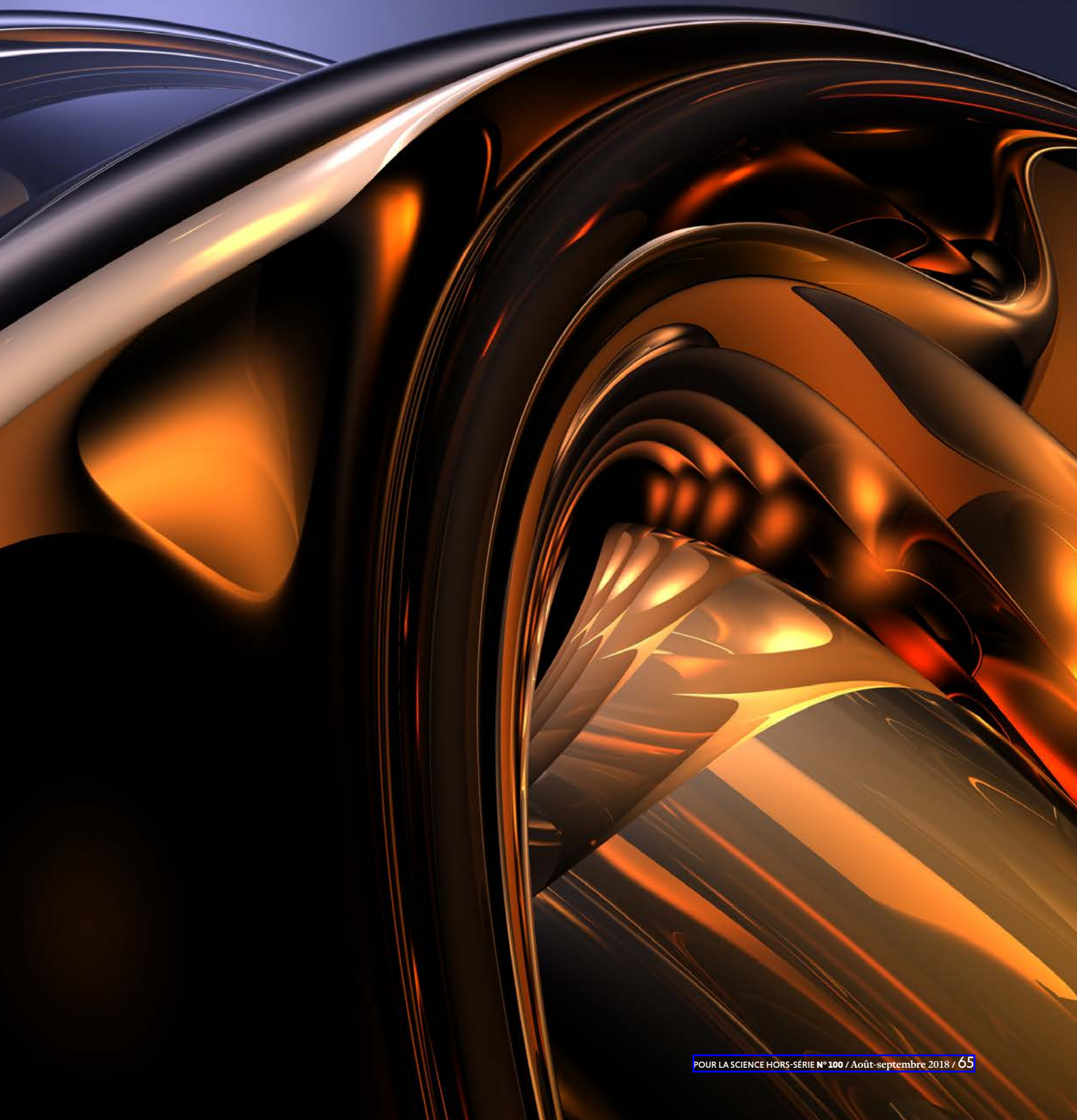
L'ESSENTIEL

- Scientifiques et ingénieurs conçoivent des instruments virtuels, dont on synthétise les sons.
- La prise en compte du jeu de l'instrumentiste, en plus de la physique de l'instrument, reste un défi.
- Cette synthèse sonore requiert une modélisation physique de l'instrument qui soit à la fois soigneuse et assez simple pour procéder en temps réel.

LES AUTEURS

THOMAS HÉLIE
directeur de recherche au CNRS, Laboratoire STMS, à l'Ircam-CNRS-SU, à Paris.

CHRISTOPHE VERGEZ
directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique et d'acoustique à Marseille (CNRS-AMU-ECM).



évoluant continûment en saxophone au cours du temps, ou même un conduit vocal de dragon ou de dinosaure pour le son au cinéma… De même, on sait aujourd'hui concevoir virtuellement des matériaux évoluant du métal au bois pendant la vibration !

Les travaux pionniers du savant allemand Hermann von Helmholtz, à la fin du XIXe siècle, et de nombreux autres, en partie rassemblés par les Américains Neville Fletcher et Thomas Rossing à la fin du XXe siècle, ont permis de comprendre le fonctionnement élémentaire des instruments de musique. En n'en retenant que les éléments clés, plusieurs équipes dans le monde ont proposé dès la fin des années 1980 des premières synthèses sonores en temps réel, c'est-à-dire des synthétiseurs, des instruments électroniques, qui calculent suffisamment vite pour que l'opérateur humain ne perçoive aucun délai entre son action (appuyer sur la touche du clavier) et le résultat sonore.

Depuis, les travaux s'attachent à améliorer les modèles pour augmenter le réalisme sonore tout en préservant le traitement en temps réel. Un autre défi pour le réalisme reste le contrôle de l'instrument virtuel : même avec une excellente modélisation de l'instrument, le premier son que l'on produit en jouant sur un instrument virtuel est souvent… un canard ! Il s'agit de construire les « réflexes coordonnés » acquis par le musicien expert et qui lui permettent de bien jouer. Avant toute tentative de synthèse par modèle physique, il faut étudier et comprendre le fonctionnement d'un instrument de musique.

Depuis Helmholtz, on sait que ce fonctionnement repose sur une boucle de rétroaction où un excitateur (anche, archet, lèvre, plectre, jet d'air…) se couple à un résonateur (tuyau, corde, membrane…). Ce faisant, le résonateur cède un peu d'énergie sous la forme d'un rayonnement acoustique, perçu par nos oreilles. Dans le cas des instruments entretenus – c'est-à-dire capables d'auto-osciller spontanément à partir d'une excitation statique telle qu'un souffle constant, par opposition aux instruments pincés ou frappés –, l'émission d'une note résulte d'un couplage entre l'excitateur et le résonateur, et requiert en permanence des ajustements très fins de la part du musicien.

Pour la synthèse sonore en temps réel, on doit réduire au maximum la complexité du modèle de l'instrument afin d'avoir des temps de calcul courts. Mais le modèle simplifié doit aussi pouvoir expliquer une grande partie du fonctionnement d'un instrument. Une telle « formulation minimale » peut intégrer des descriptions sommaires de l'excitateur et du résonateur, mais, pour expliquer et reproduire le phénomène d'auto-oscillation, elle ne peut faire l'impasse sur la nature non linéaire de l'excitateur et de son couplage avec le résonateur (*voir l'encadré page ci-contre*). L'expression « non linéaire » signifie que la réponse (ou « sortie ») du système n'est pas proportionnelle à l'action (ou « entrée ») qu'on lui applique.

Il a été montré que ces modèles simples et peu coûteux à simuler incorporent assez la physique de l'instrument pour produire des comportements comparables à ceux de l'instrument réel : le son synthétisé est déjà caractéristique de telle ou telle classe d'instruments. Cependant, il faut raffiner les modèles pour réussir à leurrer l'oreille quant à la nature synthétique du son. Comment le faire de façon compatible avec une synthèse en temps réel, c'est-à-dire en n'allongeant pas trop les temps de calcul ?

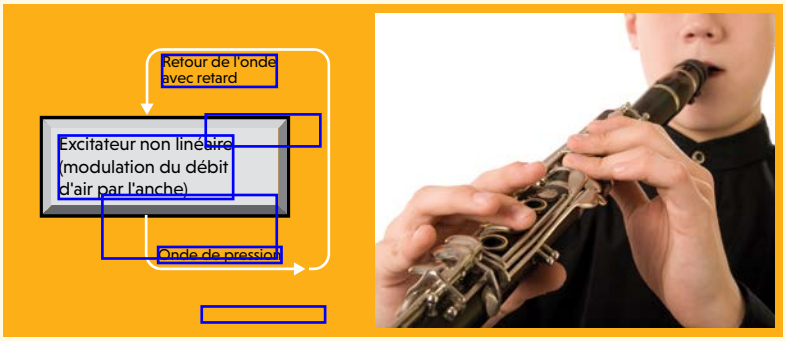
DES TUBES OU DES CYLINDRES ?

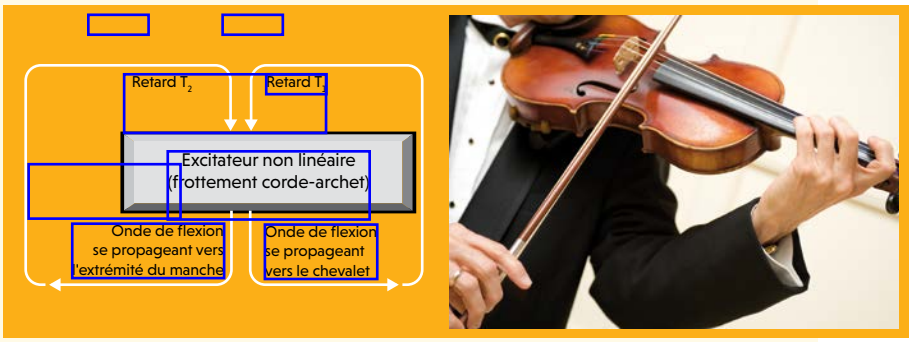
L'une des approches est de modéliser de façon simplifiée la forme géométrique du résonateur. Les résonateurs d'instruments, qu'ils soient mécaniques (cordes, plaques, etc.) ou acoustiques (tubes) sont le lieu où se propagent des ondes. Simuler précisément cette propagation dans une géométrie tridimensionnelle se révèle souvent trop coûteux en calculs. Prenons le cas d'un résonateur d'un instrument tel qu'une trompette, qui a la forme d'un tube à section variable – on parle de la « perce » de l'instrument. Comment le représenter de façon simplifiée ? La première idée pour la synthèse sonore était d'approcher cette perce par un profil en marches d'escalier, comme si l'on raccordait des tubes droits (*voir la figure page 68*).

Dans ce cadre, quand une onde acoustique plane, c'est-à-dire dont les fronts sont plans et perpendiculaires à l'axe du tube, se propage le long du tube et arrive à une discontinuité de section, elle subit une réflexion partielle

Virtuellement, on conçoit aujourd'hui des matériaux évoluant du métal au bois

DES MODÈLES MINIMAUX D'INSTRUMENTS





Les simulations les plus simples du fonctionnement d'un instrument de musique intègrent deux ingrédients clés. D'une part, il faut représenter le mécanisme non linéaire d'excitation (modulation du débit d'air par l'anche dans le cas d'une clarinette, frottement entre l'archet et la corde dans le cas d'un violon...) par un système simple d'équations non linéaires, bâti à l'aide de fonctions élémentaires. D'autre part, on doit prendre en compte les retards des ondes, c'est-à-dire les temps mis par les ondes pour effectuer un aller et retour au sein de l'instrument. Ainsi, une onde acoustique qui se propage d'une distance L dans un tube droit, puis se réfléchit, subit un retard $T = 2L/c$, imposé par la vitesse du son c.

Considérons l'exemple d'une clarinette. Un mouvement d'anche crée une fluctuation de pression qui se propage à la vitesse c le long de l'instrument, jusqu'au premier trou ouvert (situé à une distance L), où elle est réfléchie avec un changement de signe. Cette onde revient donc à l'anche après un retard $T = 2L/c$ et y modifie les conditions de pression. En conséquence, l'extrémité de l'anche se déplace, ce qui modifie le débit d'air entrant et crée une nouvelle perturbation de pression.

Autre exemple : un violon et son archet. Le frottement entre le crin enduit de colophane et la corde engendre des ondes de flexion sur chaque partie de la corde. Ces ondes se propagent à une certaine vitesse, l'une vers le chevalet, l'autre vers l'extrémité du manche. Parvenues à l'extrémité, elles y sont réfléchies. Après des temps de parcours différents T_1 et T_2 (sauf si l'archet frotte la corde en son milieu, auquel cas les temps de parcours sont égaux), les deux ondes reviennent à l'archet et interagissent à nouveau avec lui.

instantanée (comme si une partie de l'onde rebondissait sur cette jonction) et se transmet aussi partiellement au tronçon voisin.

En fin de compte, on aboutit à une « structure de guide d'ondes » où, du point de vue mathématique et informatique, n'intervient qu'un petit nombre d'opérations élémentaires : retards de l'onde proportionnels à la longueur du tube, additions, multiplications des amplitudes ondulatoires par des coefficients de réflexion qui dépendent des sections du tube. Ce modèle a été utilisé dès les années 1960 pour simuler le conduit vocal humain ; une fois optimisée, la structure informatique correspondante a été nommée, d'après les deux chercheurs qui l'ont introduite, structure de Kelly-Lochbaum (encore utilisée pendant chacun de nos appels téléphoniques pour la resynthèse de nos voix).

Mais des tubes droits raccordés restent une approximation grossière du profil doux des pavillons et de nombreux instruments. Ainsi, pour un instrument à perce régulière, la simulation crée des artefacts que l'oreille perçoit. Pour renforcer le réalisme tout en restant compatible avec un traitement en temps réel, nous avons conçu vers 2002 un modèle à une dimension qui respecte mieux la géométrie du tube.

LA GÉOMÉTRIE DE LA PERCE

On part d'un tube à symétrie axiale, avec une perce dont le rayon dépend régulièrement de la coordonnée z mesurée le long de l'axe. Le calcul des sons produits par un tel tube implique de déterminer la pression acoustique régnant en chaque point à l'intérieur du tube, en réponse à une certaine pression appliquée à l'entrée. Ainsi, pour chaque position z le long de l'axe, on s'intéresse à la pression acoustique régnant à la distance r de l'axe. Cette pression obéit à une équation, qui décrit la propagation des ondes acoustiques, et dépend à la fois de la position et du temps. Dans le plan (z, r) et à un instant donné, les points associés à une >

© Shutterstock/Sergey Lavrentev ; Andrew Duany

même valeur de la pression constituent des courbes, nommées isobares comme sur une carte météorologique (*voir la figure page 70*).

Les isobares dessinent en général des lignes courbes, ce qui traduit le fait que la pression dépend à la fois de la coordonnée radiale r et de la coordonnée axiale z. L'idée de notre modélisation unidimensionnelle revient en quelque sorte à construire un miroir déformant qui redresse les isobares, pour les transformer en lignes droites perpendiculaires à l'axe. Dans cette nouvelle image, la pression devient indépendante de la coordonnée radiale, ce qui réduit la dimension effective du problème à un et simplifie beaucoup les calculs.

L'outil mathématique qui effectue cette transformation est un changement de coordonnées dynamique: on passe des coordonnées z et r à deux autres coordonnées a et b grâce à des fonctions appropriées f et g, qui dépendent du temps t (et de la perce de l'instrument). On réécrit ensuite l'équation des ondes en termes de coordonnées a et b, de façon que la pression y apparaisse comme une fonction de la nouvelle coordonnée a uniquement, et non de b.

La géométrie du résonateur n'est pas le seul aspect à prendre en compte dans la synthèse sonore. Un autre est l'amortissement. Si l'archet ou le souffle du musicien s'arrête, le son finit par s'éteindre: un instrument de musique est un système amorti, où l'énergie perdue par l'instrument est essentiellement le son émis lui-même. Or les émissions acoustiques des tubes, barres, plaques sont connues, et on sait les prendre en compte avec une bonne approximation dans les simulations du fonctionnement d'un instrument.

Cependant, d'autres types d'amortissements intrinsèques au résonateur ont un effet important sur le son. Reprenons le cas des tubes. La colonne d'air en vibration dans le tube crée un frottement sur ses parois et échange de la chaleur avec elles. Ces phénomènes viscothermiques dépendent de la texture de la surface du tube, du type de matériau et de son aptitude à conduire la chaleur. De plus, leur effet sur les ondes sonores dépend de la fréquence de celles-ci.

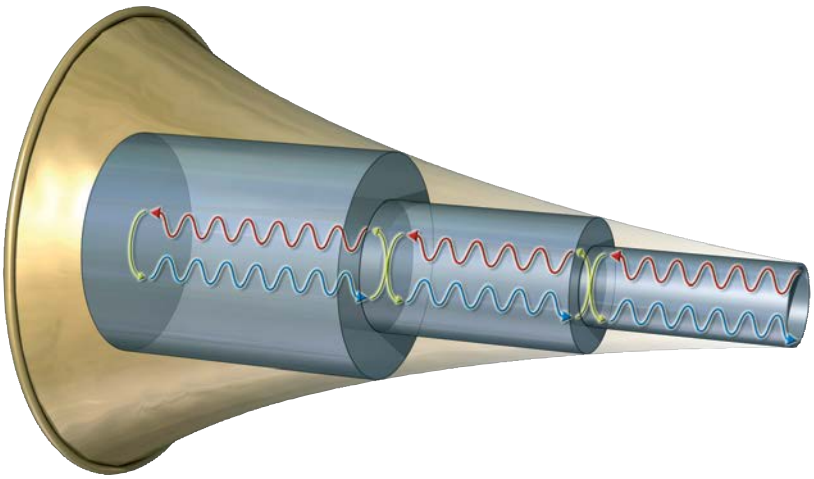
Si la modélisation n'intègre pas bien cet amortissement, le son produit par l'instrument virtuel semble, à l'oreille, synthétique. Or la prise en compte du bon amortissement peut se révéler parfois délicate sur le plan mathématique, avec par exemple une opération étonnante telle qu'une dérivation temporelle fractionnaire (de même que les puissances non entières généralisent les mises au carré ou au cube, dériver une demi-fois généralise la dérivée qui donne la vitesse à partir de la position, ou l'accélération à partir de la vitesse).

Pour les résonateurs à cordes, barres ou plaques, les amortissements peuvent avoir des complexités similaires, selon les matériaux. On devrait pouvoir leur adapter les méthodes mathématiques utilisées pour le cas des instruments à vent, ce à quoi nous nous attelons.

Comme on l'a vu, la géométrie du résonateur et les phénomènes d'amortissement viscothermiques sont deux points clés pour élaborer un instrument virtuel à rendu réaliste. Un troisième est que, dans un instrument de musique, les ondes d'amplitude élevée sont souvent distordues par des effets non linéaires.

DES DISTORSIONS NON LINÉAIRES

Voyons comment sur l'exemple de la guitare. Pour accorder votre guitare, vous réglez la tension des cordes grâce aux mécaniques: plus la tension est élevée, plus la célérité de propagation des ondes (et donc la hauteur du son!) l'est aussi. Or pendant que la corde vibre, sa longueur varie par élasticité, ce qui modifie la tension et, partant, la vitesse de propagation des ondes. Il s'ensuit une distorsion des ondes, effet d'autant plus marqué que l'on pince fortement la corde.



Pour modéliser un instrument à vent en forme de tube de perce (ou profil) variable, on peut en première approximation l'assimiler à un ensemble de trois tubes droits. À chaque jonction entre tubes, une partie des ondes acoustiques est réfléchie *(en bleu)* dans le même tube et une autre transmise *(en rouge)*; au tronçon voisin. Le modèle correspondant, après optimisation, est nommé structure de Kelly-Lochbaum.

© Bruno Bourgeois

Autre exemple: pour accorder votre trompette, vous réglez la longueur du tube à l'aide d'une petite coulisse... mais seulement après avoir joué un peu pour chauffer l'instrument. Car plus l'air est chaud, plus la célérité du son y est grande et la note est haute. Or une surpression d'une onde sonore échauffe l'air où elle se propage, ce qui augmente aussi la célérité. Ainsi, comme pour la corde de guitare que l'on pince plus fortement, souffler plus fort dans la trompette distord l'onde sonore produite.

En résumé, modestes à faible amplitude, ces effets non linéaires peuvent devenir significatifs aux nuances *fortissimo* et participent

même à la signature sonore naturelle d'un instrument. C'est le cas du « cuivrage » pour les trombones et trompettes : la brillance (renforcement des hautes fréquences par rapport aux basses) provient de telles distorsions.

Maintenant, rêvez un peu et supposez que, grâce à la modélisation physique et aux techniques mathématiques, votre trompette au profil optimisé ou votre stradivarius virtuels sont là. À vous de jouer ? Pas si simple...

En effet, le modèle physique ne fait que reproduire virtuellement la production du son lorsque les lèvres vibrent au passage de l'air soufflé dans la trompette ou lorsque la corde oscille sous l'action du frottement de l'archet. C'est déjà beaucoup, mais pas suffisant pour en faire un instrument virtuel !

Pour transformer un programme informatique qui simule la physique de la production du son en instrument de musique, il faut lui adjoindre une interface homme-machine adaptée. Par ce biais, l'utilisateur peut modifier les valeurs de certains paramètres des équations du modèle physique (souffler plus fort, tendre ses lèvres, modifier la vitesse de l'archet ou son appui sur la corde...). C'est le

UN ESCARGOT POUR S'ACCORDER

Une vibration sonore se compose d'oscillations d'amplitudes et de fréquences différentes, dont l'ensemble forme le « spectre du son ». Les analyseurs de spectres sonores standards affichent des courbes d'amplitude, correspondant au volume du son, en fonction de la fréquence.

L'application « The Snail – IrcamLab » repose sur la combinaison de deux éléments : un nouveau procédé d'analyse du spectre du son, et une représentation de ce spectre sous une forme en spirale (d'où le nom *snail*, c'est-à-dire escargot) adaptée à une échelle musicale.

Le procédé apporte une précision fréquentielle assez fine pour travailler sur l'accordage ou le microaccordage. La représentation cartographie les composantes du son sous une forme assez intuitive. L'axe des fréquences, enroulé en spirale, va des graves (au centre) vers l'aigu (à l'extérieur), de sorte qu'un tour correspond à une octave (soit le doublement d'une fréquence). Ainsi, toutes les composantes fréquentielles en relation d'octave (c'est-à-dire partageant le même nom de note) sont alignées sur un rayon de l'escargot et partagent le même angle.

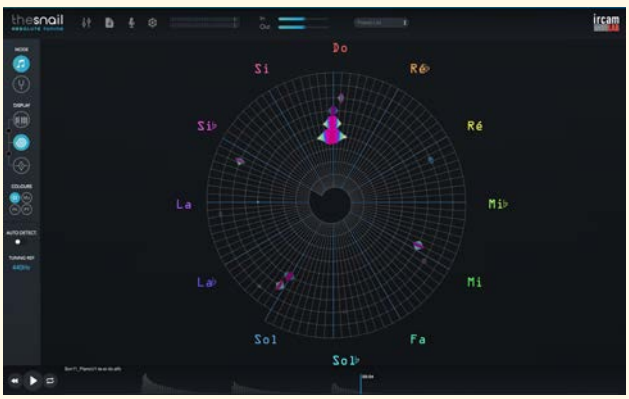
Graphiquement, les composantes actives du spectre sont reportées sur ce squelette en spirale de sorte qu'un stimulus auditif se traduit par un stimulus visuel en cohérence avec l'échelle perceptive.

Si l'on repère sur la spirale l'angle associé à une fréquence de référence (un *la* à 440 hertz par exemple) et que l'on divise un tour complet en douze angles égaux, on conçoit une grille correspondant à la gamme tempérée, où les douze notes sont séparées par un demi-ton (*voir la figure*). D'autres choix de marquage permettent d'exploiter d'autres diapasons et d'autres tempéraments.

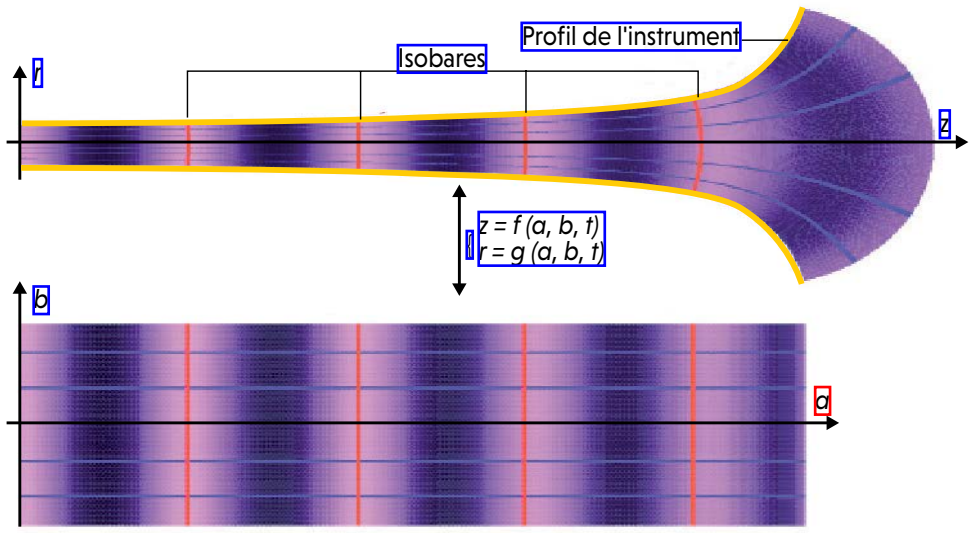
La figure montre l'analyse par Snail du *do* central (noté *do* 3) d'un piano droit (*le point en cyan indique le diapason, ici, 440 Hz*). On constate qu'une note est composée de plusieurs vibrations simultanées. La composante la plus forte est la fondamentale (le *do* 3 correspond à la tache la plus étendue, en rose). Puis après un tour de spire (dans le sens des aiguilles d'une montre, vers l'extérieur), vient l'harmonique 2 (le *do* 4), puis 3 (*sol* 4), puis 4 (*do* 5), puis 5 (*mi* 5, décalé par rapport à la ligne), puis 6 (*sol* 5, non aligné avec le *sol* 4), puis 7 (*si* bémol 5), puis 8 (*do* 6), puis 9 (*ré* 6, plus haut)... Le défaut d'alignement entre les composantes des notes (*do*, *mi*, *sol*...) exprime précisément l'inharmonicité : on ne parle plus dans ce cas d'harmonique, mais de partiel. La déviation des composantes par rapport aux traits de repère (ici, tracés pour le tempérament égal) exprime les déviations aux références de ce tempérament.

L'ensemble offre en fin de compte un outil précis pour le musicien ou une personne travaillant dans le son. De plus, cet outil est utilisable dès le plus jeune âge, par exemple, pour affiner le contrôle de la hauteur de la voix avec des consignes simples telles que « chanter en essayant d'aligner ses propres points lumineux sur une note de la grille ».

THOMAS HÉLIE ET CHARLES PICASSO
Laboratoire STMS (Ircam-CNRS-SU)



L'analyse par Snail du *do* central (*do* 3) d'un piano droit *(le point en cyan indique le diapason, ici, 440 Hz).*



Les ondes acoustiques qui se propagent dans un tube symétrique autour de son axe Oz représentent un problème à deux dimensions, où les coordonnées pertinentes sont *z* et *r* (distance à l'axe). Les isobares sont ici des courbes. En effectuant un changement de coordonnées dynamique de *(z, r)* en *(a, b)*, à l'aide de fonctions appropriées *f* et *g* qui dépendent du temps et du profil du tube, on peut redresser les isobares. Autrement dit, les isobares deviennent des droites perpendiculaires à l'axe de la coordonnée *a*, ce qui signifie que la pression est indépendante de la coordonnée *b*. La dimension du problème se réduit à un, ce qui simplifie les calculs.

point clé qui permet au musicien d'interagir avec le modèle physique et d'en jouer comme un instrument virtuel.

Quelle forme peut prendre l'interface homme-machine ? Il en existe une multitude, allant des plus simples aux plus élaborées. Les claviers de commande (qui ressemblent à un clavier de piano) sont parmi les plus anciennes et les plus répandues, mais certainement pas les plus adaptées pour transmettre des gestes comme l'évolution d'une pression dans la bouche ou le frottement d'un archet.

Pour les instruments à vent, une alternative a été proposée avec des contrôleurs de souffle, dispositifs qui peuvent évoquer visuellement un instrument à vent mais qui ne produisent pas de son. En revanche des paramètres sont mesurés (par exemple la pression d'air avec laquelle on souffle, le doigté choisi) et envoyés au modèle physique. Ces dernières années, avec l'avènement des smartphones et tablettes, l'écran est également devenu une interface homme-machine pour le pilotage des modèles physiques.

Par exemple, votre doigt frottant l'écran peut devenir un archet qui joue du violon virtuel : la corde que vous frottez à l'écran, la vitesse de déplacement du doigt et son écrasement sont autant d'informations transmises en temps réel au modèle physique simulé sur le téléphone ou la tablette, qui peut alors atteindre le statut d'instrument virtuel complet.

Depuis les premiers synthétiseurs, les pianistes ont eu la chance de pouvoir tirer parti de leur maîtrise du jeu sur clavier. Des pianos hybrides ont même été conçus où, au mode de jeu traditionnel – les marteaux, actionnés par les touches du clavier, frappent des cordes – s'ajoute un mode hybride, où les marteaux frappent des capteurs qui envoient à un synthétiseur les caractéristiques de la frappe (instant et vitesse du choc). Ainsi, plus de problèmes de voisinage, le jeu au piano peut se faire en silence, un casque sur les oreilles !

DES CLARINETTES HYBRIDES ?

Pour les instruments à anche comme la clarinette et le saxophone, le projet de recherche INVENTHEA (un partenariat CEA List, le Laboratoire de mécanique et d'acoustique du CNRS et le fabricant Buffet Crampon) cherche aujourd'hui à proposer des instruments hybrides à anche.

Dans le même esprit que pour le piano, l'idée est de pouvoir rendre facilement l'instrument muet, tout en mesurant de manière non intrusive ce que fait l'instrumentiste (souffle, doigté, pincement de l'anche) pour envoyer ces informations à un modèle physique qui assurera la production du son. Les calculs du son pourront être faits par le téléphone dans la poche du musicien. Le son sera alors, selon les envies et le contexte, amplifié ou écouté au casque. Et ce n'est plus de la science-fiction d'imaginer que, demain, un saxophoniste pilotera depuis son saxophone un modèle physique de clarinette, de trompette, ou de violon !

Les progrès permettent aujourd'hui de proposer certaines optimisations aux facteurs d'instruments. Quant aux instrumentistes et aux chanteurs, des nouveaux outils (*voir l'encadré page précédente*) leur offrent à présent des moyens de visualiser en temps réel le son produit, et qui sont adaptés par exemple au travail de l'écoute, la justesse, l'intonation en solo ou en groupe. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. HÉLIE ET A. AGULLO, **Le Snail-Absolute Tuning: visualiser les sons et accorder des instruments de manière précise et intuitive,** ***Presse CNRS,*** **2016. http://bit.ly/2l3IbB8**

A. CHAIGNE ET J. KERGOMARD, ***Acoustique des instruments de musique,*** **2e édition, Belin, 2013.**

Le projet INVENTHEA, 2015. http://bit.ly/2l2ooNe

E. RECK MIRANDA ET M. WANDERLEY, ***New Digital Musical Instruments: Control And Interaction Beyond the Keyboard,*** **A-R Editions, 2006.**

© Thomas Hélie et Christophe Vergez

POUR LA SCIENCE
Édition française de Scientific American

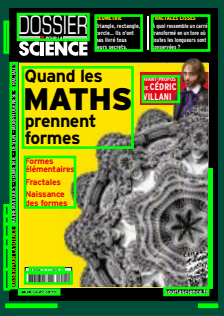
HORS-SÉRIE

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !

N° 88 (juil. 15)
réf. DO088

N° 89 (oct. 15)
réf. DO089

N° 90 (janv. 16)
réf. DO090



N° 91 (avr. 16)
réf. DO091

N° 92 (juil. 16)
réf. DO092

N° 93 (oct. 16)
réf. DO093

N° 94 (janv. 17)
réf. DO094

N° 95 (avr. 17)
réf. DO095

N° 96 (août 17)
réf. DO096

N° 97 (nov. 17)
réf. DO097

N° 98 (févr. 18)
réf. DO098

N° 99 (mai 18)
réf. DO099

RETROUVEZ L'ENSEMBLE DES ANCIENS NUMÉROS SUR **BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR/HORS-SERIE.HTML**

À retourner accompagné de votre règlement à :
Pour la Science – Service VPC – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr

☑ **OUI, je commande des numéros de Pour la Science Hors-série, au tarif unitaire de 10,90 €.**

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1re réf. 0 1 x 10,90 € = 1 0 9 0 €
2e réf. ..... x 10,90 € = ... €
3e réf. ..... x 10,90 € = ... €
4e réf. ..... x 10,90 € = ... €
5e réf. ..... x 10,90 € = ... €
6e réf. ..... x 10,90 € = ... €

TOTAL À RÉGLER ..... €

Offre valable jusqu'au 31/12/2018 en France Métropolitaine. Pour une livraison à l'étranger, merci de consulter **boutique.pourlascience.fr**

Les informations que nous collectons dans ce bon de commande nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour La Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : https://rebrand.ly/charte-donnees-pls Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme
Nom : .....
Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal ..... Ville : .....
Téléphone .....
J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ **Par chèque** à l'ordre de *Pour la Science*
☐ **Carte bancaire**
N° .....
Date d'expiration .....
Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) .....

Signature obligatoire :

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

PLUS SIMPLE, PLUS RAPIDE
ABONNEZ-VOUS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

Un son en trois dimensions

Essentielle aux jeux vidéo et aux home cinémas, la spatialisation du son consiste à créer l'illusion que des sons proviennent de diverses directions et à organiser ainsi des scènes sonores en trois dimensions. Un domaine en plein essor.

Bien installé dans votre fauteuil, vous savourez: les cuivres se font entendre à votre droite, les bois suivent à gauche, avant de laisser place aux ensembles de cordes droit devant vous. Incroyable cette nouvelle philharmonie parisienne avec son acoustique presque parfaite ! Pourtant, vous n'êtes pas dans ce nouveau lieu dédié à la musique symphonique, vous êtes... dans votre canapé, à écouter de la musique *via* votre tout nouveau système de home cinéma.

C'est en tout cas ce que vantent les publicités pour les systèmes de «son 3D». Y a-t-il tromperie sur la marchandise? Non, mais la spatialisation du son proposée par les équipements audio grand public est loin d'être parfaite. En conséquence, ce domaine de recherche est en plein essor. Au fait, de quoi parle-t-on?

JEUX VIDÉO ET HOME CINÉMA

La spatialisation du son rassemble les techniques de contrôle de la direction apparente de provenance des sons et la simulation ou la modification des effets acoustiques d'une salle de concert. L'introduction des techniques électroacoustiques en musique, au cours du XX^{e} siècle, a >

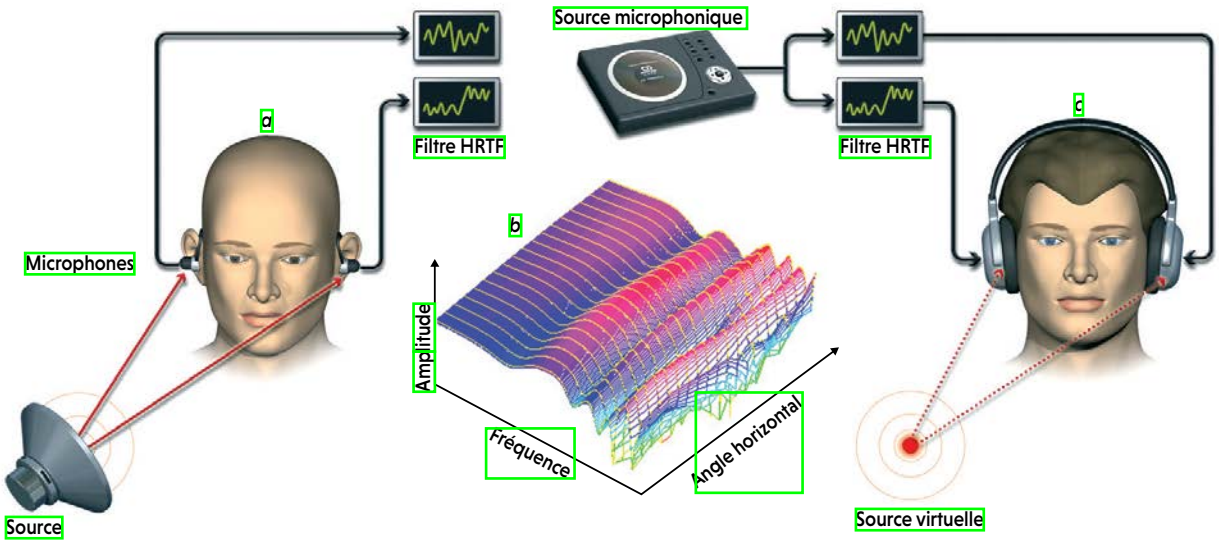
L'ESSENTIEL

- La perception auditive spatiale dépend de caractéristiques physiologiques et d'un traitement cognitif.
- La spatialisation du son autorise des expériences de réalité augmentée et de nouvelles façons d'écouter, notamment sur les appareils mobiles.
- La technique binaurale restitue l'illusion d'un son spatialisé dans un casque à l'aide de filtres encodant l'effet des directions de provenance.
- L'holophonie consiste à reconstruire le champ acoustique voulu dans toute une région de l'espace.

L'AUTEUR

OLIVIER WARUSFEL est chargé de recherche à l'Ircam, où il dirige l'équipe Acoustique des salles.

© wacomka / shutterstock.com



La restitution binaurale. Pour une source donnée, on mesure d'abord les différences de temps d'arrivée et d'amplitudes aux deux oreilles d'un auditeur *(a)*. Ces différences, qui permettent de localiser la source sonore, sont caractérisées par une paire de filtres dits HRTF *(b)*. On construit de même des filtres pour toutes les directions. Pour spatialiser un son monophonique, il suffit ensuite d'appliquer au signal émis la paire de filtres correspondant à la direction souhaitée : tout se passe comme si le son reconstruit venait d'une source virtuelle située au même endroit que la source réelle d'origine *(c)*.

considérablement enrichi le répertoire des timbres, mais aussi la mise en scène des sons dans l'espace. La spatialisation du son est devenue un aspect incontournable de la création musicale. Grâce à l'outil informatique, il est désormais possible de placer et d'animer des sources sonores de façon arbitraire, dans n'importe quelle direction, et ainsi de prolonger la scène traditionnelle où se trouvent les instrumentistes.

En parallèle, la spatialisation du son a connu une percée fulgurante chez le grand public par le biais des dispositifs de son 3D pour le home cinéma ou les jeux vidéo. Dans ces derniers, une composante sonore spatialisée est essentielle pour accroître le réalisme et l'immersion du joueur dans l'environnement de synthèse.

Quel que soit leur domaine d'application, les procédés de spatialisation font appel à plusieurs disciplines : informatique, acoustique, traitement du signal, psychoacoustique ou encore cognition. La synthèse de la direction et de la distance des sources sonores, de la propagation du son, ainsi que sa reproduction s'appuient à la fois sur la modélisation physique des phénomènes en jeu et sur des modèles de la perception auditive spatiale.

D'OÙ VIENT CE SON ?

Intéressons-nous d'abord à la perception spatiale du son, à la base de diverses techniques de spatialisation du son. Contrairement à la vue, qui chez l'être humain, souffre d'un champ limité, l'audition couvre l'ensemble de l'espace. Notre capacité à localiser des sources sonores repose sur la comparaison entre les signaux parvenant à nos deux oreilles, qui dépendent bien sûr de la position de celles-ci, mais aussi de la diffraction des ondes acoustiques sur notre tête. Ces phénomènes dépendent de la direction d'incidence des ondes et permettent de localiser la source.

Les performances de localisation du système auditif humain en azimut (dans le plan horizontal) sont de l'ordre de trois degrés pour des sources voisines du plan de symétrie de la tête. Elles tombent à une dizaine de degrés pour des sources situées sur le côté.

Comment fonctionne la localisation en azimut ? Les deux indices fondamentaux sont la différence entre les temps d'arrivée aux oreilles (ITD, pour *interaural time difference*), traduisant leur écartement, ainsi que la différence d'intensité (ILD, pour *interaural level difference*), liée à l'obstacle de la tête. Ces indices dits binauraux décrivent les relations entre les signaux captés par les deux oreilles. Toutefois, des considérations géométriques simples révèlent qu'à un couple de valeurs données des indices interauraux de retard et d'intensité correspondent plusieurs directions possibles. Ainsi, pour chaque direction dans le plan médian, les différences interaurales sont nulles. Des mécanismes plus fins sont nécessaires pour différencier les directions dans cette zone de confusion et plus généralement permettre la localisation en élévation.

En raison de l'interaction complexe des ondes sonores avec notre corps (diffraction par le crâne, le pavillon de l'oreille, les épaules…), les variations de différences d'intensité dépendent de la fréquence du son. Dans les basses fréquences, les longueurs d'onde – plusieurs mètres – sont grandes par rapport aux dimensions de la tête. Celle-ci n'est donc pas un obstacle majeur et la différence de niveau sonore entre l'oreille du côté de la source (ipsilatérale) et l'oreille opposée (controlatérale) est faible.

Plus la fréquence du son est élevée – plus sa longueur d'onde diminue –, plus les caractéristiques morphologiques contribuent à différencier les signaux parvenant aux deux oreilles. Ainsi, chaque direction d'incidence s'accompagne d'une «coloration spectrale» particulière du son, que notre cerveau apprend à identifier. En d'autres termes, la perception auditive spatiale consiste à décoder l'effet de notre propre perturbation sur

© Bruno Bourgeois

le champ d'ondes acoustiques. Les indices spectraux sont notamment sollicités pour discriminer les directions avant, arrière et, de façon plus générale, dans le plan vertical. La nature plus subtile de ces indices explique les performances assez médiocres de la localisation en élévation (angle vertical), de l'ordre de 10 degrés de face, jusqu'à 30 degrés vers le haut ou l'arrière.

La perception de la distance dépend de plusieurs facteurs. L'éloignement de la source entraîne une baisse de l'intensité sonore et une atténuation des hautes fréquences liée à l'absorption par l'atmosphère. Ces indices ne sont cependant pas absolus; ils supposent eux aussi un traitement cognitif fondé sur une connaissance préalable de la puissance et du spectre émis par la source. Lorsque nous identifions une voix, un véhicule..., nous en comparons le niveau et le timbre par rapport à d'autres événements du même type, dans diverses situations spatiales (proche, derrière...), gardés dans notre mémoire.

D'autres facteurs s'ajoutent dans le cas d'environnements réverbérants comme une salle, pour lesquels notre perception s'appuie sur le rapport entre l'intensité directe de la source, qui varie avec la distance, et l'intensité réverbérée, qui est uniformément répartie dans la salle.

Les systèmes de restitution sonore spatiale visent, de façon générale, à reproduire aux oreilles d'un auditeur les valeurs appropriées de ces indices de localisation selon la position souhaitée d'une source sonore virtuelle. Pour ces systèmes, on distingue trois familles: la stéréophonie et ses extensions, les techniques binaurales, réservées à la restitution sur casque, et les techniques de synthèse du champ acoustique. Au-delà de la fidélité avec laquelle elles reproduisent les indices de localisation, les mérites respectifs de ces différentes techniques se mesurent en termes de nombres de canaux à gérer et de contraintes sur la position et la mobilité de l'auditeur par rapport au dispositif de restitution.

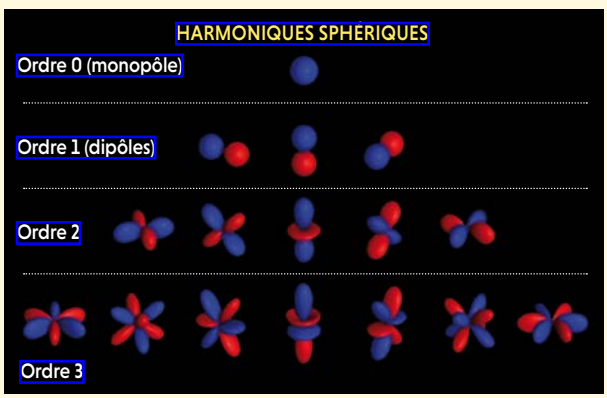
EN HIFI ET EN STÉRÉO

Le modèle de restitution spatiale du son le plus utilisé encore aujourd'hui reste la stéréophonie. Deux haut-parleurs sont placés devant l'auditeur. En jouant sur le retard ou le niveau relatif des signaux envoyés à chaque haut-parleur, on contrôle de façon simplifiée les indices de localisation interauraux (ITD et ILD), ce qui donne naissance à une source sonore fictive. La direction de cette «source fantôme» est limitée à la zone encadrée par les deux haut-parleurs. L'utilisation d'un simple retard entre les deux canaux aboutit à une zone de restitution très limitée. La plage de variation du retard pour laquelle les signaux fusionnent pour créer une image fantôme est en effet très restreinte. Dès que le retard dépasse une milliseconde (soit un décalage de 30 centimètres environ), le signal en retard est inhibé: il n'intervient plus dans le traitement perceptif de la localisation (effet Hass). En conséquence, un auditeur décalé, même légèrement, de l'axe médian des deux haut-parleurs aura l'illusion que l'ensemble de la scène stéréophonique se déporte de façon abrupte vers le haut-parleur le plus proche. L'utilisation conjointe d'une différence de gain contribue à limiter cet effet, sans toutefois le compenser totalement.

Par extension, il est possible de reproduire un son spatialisé sur des ensembles de haut-parleurs, plans ou tridimensionnels, disposés autour de l'auditeur. L'exemple le plus courant est la configuration «5.1» (cinq haut-parleurs répartis dans le plan horizontal) des formats sonores cinématographiques, également utilisés dans les jeux vidéo. Les installations sonores plus ambitieuses nécessitent la mise en place de dômes constitués de quelques dizaines de haut-parleurs. Pour synthétiser la direction d'une source sonore, on sélectionne la paire ou le triplet de haut-parleurs entourant la direction désirée et l'on règle les >

LA DÉCOMPOSITION HARMONIQUE

La spatialisation par décomposition harmonique consiste à représenter l'organisation spatiale du champ acoustique d'un point de vue angulaire (sans notion de distance) sous forme d'une superposition de fonctions périodiques de l'espace, les harmoniques sphériques, chacune associée à un canal audio.
L'harmonique d'ordre 0 (monopôle) correspond à une variation de pression homogène dans toutes les directions. Les harmoniques d'ordre 1 (dipôles) caractérisent chacune un gradient de pression selon une des trois directions de l'espace. Les cinq harmoniques d'ordre 2, puis celles des ordres supérieurs, représentent des modes de vibration plus complexes; elles permettent de préciser de façon progressive la dépendance angulaire du champ acoustique. La description exacte de celle-ci requiert en théorie un nombre infini d'harmoniques, et donc de canaux.



gains et éventuellement les retards relatifs en fonction de la direction souhaitée.

Ces systèmes partagent toutefois les mêmes limitations : l'illusion d'une source fantôme n'est valide qu'en un point particulier de l'espace (au centre du dispositif) et, à l'instar des trompe-l'œil, l'auditeur ne peut s'écarter de cette position sous peine de déformations, voire de dissipation totale de l'illusion spatiale.

La technique binaurale, pour sa part, court-circuite toute connaissance et modélisation physique ou perceptive des phénomènes en jeu et se contente de reproduire la réalité : son principe est de reconstruire directement l'ensemble des indices de localisation à partir de mesures acoustiques effectuées sur une tête humaine.

Longtemps confinée au laboratoire, elle a aujourd'hui atteint un degré de maturité qui rend possible son utilisation dans des contextes grand public, tels le jeu ou les télécommunications. La technique binaurale repose sur une procédure d'analyse et de synthèse du son perçu dans plusieurs directions. On peut l'assimiler aux techniques d'échantillonnage très utilisées dans le domaine de la synthèse sonore, où la simulation d'un instrument (piano, trompette, orgue…) repose sur deux étapes : la constitution préalable d'une banque de sons enregistrés, parfois note par note, sur de vrais instruments, puis la restitution simple ou faiblement modulée de ces sons lors du jeu sur l'instrument virtuel.

CASQUE OBLIGATOIRE

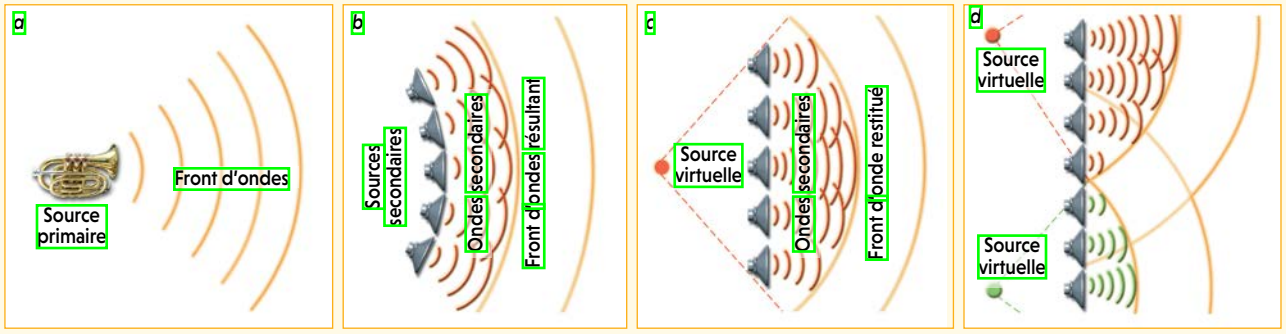
Dans le cas de la synthèse binaurale, la première étape ne consiste pas à enregistrer des sons spatialisés, mais à mesurer la transformation – ou filtrage – subie par une onde sonore au cours de sa propagation, de sa source jusqu'aux tympans d'un auditeur. Pour cela, on insère des microphones dans les conduits auditifs et on enregistre la réponse à un signal (en pratique, une impulsion) émis depuis une direction donnée. Ces mesures doivent se dérouler en chambre anéchoïque (sans écho) pour éviter les perturbations entraînées par la réflexion des parois. La réponse à cette impulsion élémentaire suffit à caractériser une fois pour toutes le couple de filtres (correspondant aux oreilles droite et gauche) associé à la direction d'incidence de l'onde sonore.

Ces filtres, connus sous le nom de « fonctions de transfert de la tête » ou HRTF (pour *head related transfer functions*), portent la trace de l'ensemble des phénomènes acoustiques

L A SYNTHÈSE DU CHAMP ACOUSTIQUE

L'holophonie ou synthèse du champ acoustique (WFS) s'appuie sur le formalisme ondulatoire de Huygens. À tout instant, chacun des points du front d'une onde originaire d'une source primaire *(a)* peut être vu comme une source secondaire qui réémet une ondelette sphérique de même phase et de même amplitude. Un instant plus tard, l'enveloppe de ces ondelettes secondaires correspond au front d'onde de l'onde primaire *(b)*. Pour reconstruire une onde acoustique, il suffit ainsi de disposer d'un ensemble de sources secondaires. Le champ acoustique s'exprime comme la somme des ondes émises par un réseau de sources secondaires situées sur une surface fermée entourant la région de restitution, ou sur un plan infini séparant les sources de cette région. Pour que la reproduction du champ sonore soit exacte, il faut une distribution infinie et continue de sources secondaires.

En pratique, un réseau de haut-parleurs espacés de quelques dizaines de centimètres et disposés dans le plan des auditeurs joue le rôle des sources secondaires. En imprimant un décalage temporel (retard) et une variation d'amplitude (gain) au signal issu de la source primaire envoyé sur chaque haut-parleur, on crée un front d'onde cohérent qui semble provenir d'une source virtuelle *(c)*, dont la position est identique pour tous les auditeurs. On peut de même créer de multiples sources virtuelles *(d)*. Le dispositif de synthèse du champ acoustique installé en front de scène à l'espace de projection de l'Ircam *(e)* permet de spatialiser le son en temps réel, et de jouer sur la localisation du son de l'instrument et du son électroacoustique pour créer un instrument « augmenté » en les fusionnant, ou au contraire, les dédoubler en créant un ou plusieurs instruments virtuels éloignés.



© Bruno Bourgeois

survenus durant la propagation du son. L'opération est répétée pour un grand nombre de directions, de façon à baliser toute la sphère auditive et constituer une base de données de filtres directionnels.

Par la suite, lors de la synthèse spatiale, il suffit d'appliquer à tout signal monophonique, par exemple une voix captée par un microphone, le couple de filtres correspondant à la direction de la source virtuelle souhaitée. Les deux signaux obtenus, diffusés dans un casque, restituent de façon exhaustive les indices acoustiques responsables de la localisation auditive spatiale, et ce pour n'importe quelle direction présente dans la base de données.

Cette technique est réservée à la restitution sur un casque, faute de quoi, lors de la diffusion, le filtrage propre au trajet entre les enceintes et les oreilles de l'auditeur se superpose au filtre choisi et perturbe l'illusion sonore. En adaptant «en temps réel» le couple de filtres appliqué en fonction de la direction de la source ou des mouvements de l'auditeur, on obtient sans peine une source fictive en mouvement.

La synthèse binaurale partage les mêmes limites que l'échantillonnage: ne reposant sur aucune modélisation, elle se prête mal aux manipulations. Elle nécessite par exemple la constitution d'une lourde banque de filtres. En effet, bien qu'il soit possible de reconstruire une direction manquante par interpolation entre deux directions voisines, celles-ci ne doivent pas être éloignées de plus de 15 degrés sous peine de voir apparaître des effets indésirables. La reproduction de sources en mouvement nécessite même des mesures tous les cinq degrés environ, ce qui conduit à des bases de données de l'ordre de 200 à 600 couples de filtres pour couvrir l'ensemble des directions.

En outre, les filtres HRTF dépendent par nature de la morphologie de l'auditeur. Ainsi, l'utilisation de filtres «génériques», mesurés sur une tête artificielle, entraîne en général des erreurs de localisation, en particulier des confusions avant-arrière.

Cependant, le couplage d'un dispositif de synthèse binaurale avec un capteur d'orientation de la tête permet d'asservir de façon continue la scène sonore diffusée aux mouvements de l'auditeur. Cette rétroaction est déterminante pour l'auditeur, puisqu'elle lui permet de rétablir la corrélation entre ses propres mouvements et les variations des indices acoustiques transmis et réduit de façon considérable les confusions avant-arrière.

La technologie binaurale reste à ce jour le mode de restitution spatiale le plus rigoureux, et son utilisation se justifie non seulement dans le cadre d'études sur la perception et la cognition auditive spatiale, mais également sur le terrain du jeu ou des installations sonores interactives.

Enfin, des approches plus récentes de la reproduction sonore s'attachent à modéliser et à reconstruire de façon précise les propriétés physiques du champ acoustique dans une zone plus ou moins large autour des auditeurs, en s'appuyant sur la résolution de l'équation d'onde. Parmi ces méthodes, on distingue les techniques holophoniques comme la *wave field synthesis* (WFS) et les approches par «décomposition harmonique», comme les formats Ambisonics. Développée dans les années 1980 à l'université de Delft, aux Pays-Bas, la WFS suscite aujourd'hui un large intérêt, car le grand nombre de canaux (jusqu'à plusieurs centaines) que nécessite cette technique de synthèse spatiale n'est plus un obstacle technique.

L'holophonie ou synthèse du champ acoustique s'appuie sur le formalisme ondulatoire de Huygens

JOUER AVEC LES FRONTS D'ONDE

Le signal sonore d'une source primaire que l'on désire spatialiser est diffusé sur un réseau de haut-parleurs très proches les uns des autres. Sous certaines conditions, la juxtaposition des fronts d'onde émis par chacune de ces sources secondaires est alors équivalente au front d'onde d'une unique onde acoustique, provenant d'une source primaire virtuelle. Un contrôle adéquat du retard temporel et de l'intensité du signal envoyé sur chaque haut-parleur permet d'obtenir la création d'un front d'onde commun qui a pour origine n'importe quelle position souhaitée (*voir l'encadré page ci-contre*). Ce traitement doit être répété de façon indépendante pour chaque source composant la scène sonore.

En toute rigueur, la reproduction exacte du champ acoustique requiert une infinité de sources secondaires. En pratique, on se limite à créer des sources virtuelles dans le plan horizontal des auditeurs. Les sources secondaires sont alors elles-mêmes placées dans ce plan, et moyennant quelques termes correctifs, il suffit d'installer des haut-parleurs le long d'une couronne autour des auditeurs, ou d'une rangée devant eux.

De même, la distribution en théorie continue de sources secondaires est remplacée par un nombre fini de haut-parleurs régulièrement espacés. Cette discrétisation se traduit par une dégradation de la qualité de restitution spatiale dans les hautes fréquences. En pratique, pour assurer que l'indice interaural de retard soit reproduit de façon fiable dans la gamme de fréquences où il est primordial et sur l'ensemble de la région d'écoute, la fréquence limite est fixée au-dessus d'un kilohertz, ce qui conduit à un écartement maximal des haut-parleurs de l'ordre de 15 centimètres.

Si la stéréophonie s'appuie sur un modèle centré sur l'auditeur, la WFS adopte au contraire un point de vue exocentrique: le champ sonore >

est décrit et reproduit quel que soit le placement des auditeurs. La technique est donc particulièrement adaptée aux situations où les auditeurs sont multiples et en mouvement, comme les concerts, les installations sonores, les expositions… Cette technique a d'ailleurs été utilisée pour les expositions Dada, en janvier 2006, et Beckett, en 2007, au Centre Pompidou, à Paris.

LA DÉCOMPOSITION DU SON

L'autre approche pour reconstruire le champ acoustique est la décomposition en harmoniques (la famille des formats Ambisonics). Introduite dans les années 1970 par Michael Gerzon, alors à l'université d'Oxford, elle fait depuis une vingtaine d'années l'objet de nombreuses recherches. Elle repose également sur un formalisme physique, mais adopte un point de vue centré sur l'auditeur.

Par analogie avec l'analyse de Fourier, qui consiste à représenter un signal sous la forme d'une superposition de fonctions sinusoïdales, le champ acoustique entourant l'auditeur est représenté par une superposition de fonctions périodiques de l'espace (des harmoniques sphériques ou cylindriques), chacune associée à un canal audio (*voir l'encadré page 75*). Pour représenter un signal ayant une forte variabilité temporelle, on utilise des composantes sinusoïdales de fréquences élevées ; de même, plus on désire décrire de façon précise l'organisation spatiale d'une scène sonore, plus il faut tenir compte des harmoniques spatiales d'ordre élevé et donc utiliser un nombre important de canaux. Pour encoder l'intégralité de l'information spatiale, il faudrait en théorie une infinité de canaux.

Le principal intérêt du format Ambisonics est que l'encodage est indépendant du dispositif de restitution et hiérarchique. Le signal envoyé à chaque haut-parleur est une combinaison linéaire des canaux correspondant à chaque harmonique, dont les coefficients ne dépendent que du nombre et de la position des enceintes autour des auditeurs. Pour reproduire une scène sonore avec une précision spatiale – un ordre d'harmonique – donnée, il suffit de disposer d'un nombre de haut-parleurs supérieur ou égal aux nombres de canaux. Si l'on ne dispose pas d'assez de haut-parleurs, la scène peut être néanmoins décodée sans déformation, mais avec une précision spatiale inférieure.

Cette technique est bien adaptée aux applications de réalité virtuelle. On peut en effet enregistrer une scène sonore complexe comportant de nombreuses sources en encodant son organisation tridimensionnelle, puis l'importer dans un environnement virtuel. La facilité de manipulation permet de réorienter la scène en 3D pour compenser le mouvement de la tête de l'utilisateur.

Les systèmes de spatialisation ne peuvent se contenter de simuler la direction des sources composant une scène virtuelle. Ils doivent aussi rendre compte de l'interaction des ondes avec l'environnement, dont la réflexion et la diffraction sur les obstacles et les parois. Reproduire ces effets est primordial pour que l'auditeur puisse estimer correctement la distance de la source et construire une représentation auditive cohérente du lieu virtuel où il évolue.

Parmi les différentes approches, on retrouve la distinction entre la synthèse par échantillonnage, par modèle physique ou par analyse et synthèse des propriétés acoustiques de la salle virtuelle. Toutes aboutissent cependant à un filtre, par lequel le son brut émis par la source doit être transformé pour reproduire les effets de l'environnement. Une première possibilité est d'acquérir des réponses acoustiques d'environnements réels. C'est l'extension de la technique binaurale, à ceci près que l'enregistrement est réalisé non plus dans une chambre anéchoïque, mais dans la salle que l'on veut simuler. Le filtre obtenu consigne l'ensemble

Grâce au théâtrophone, Marcel Proust écoutait en stéréo des pièces de théâtre sans sortir de chez lui.

des réflexions et absorptions subies par les ondes sonores. On constitue ainsi une bibliothèque de réponses de salles typiques. À l'instar de la technique binaurale, cette méthode garantit l'authenticité auditive de la simulation, mais elle souffre du caractère figé de la situation enregistrée. En particulier, elle interdit toute interactivité puisque la réponse est établie pour une position et une orientation données de la source et du récepteur, dans un lieu donné.

L'approche physique repose sur la simulation du comportement acoustique des parois du lieu virtuel. Les méthodes les plus courantes se fondent sur le modèle des «rayons sonores» qui se propagent en ligne droite dans l'espace. Les algorithmes construisent de façon itérative l'ensemble des chemins le long desquels le son se propage, en s'appuyant sur des modèles de diffusion atmosphérique, de réflectance des surfaces, de diffraction des arêtes... Les propriétés géométriques de l'ensemble des chemins permettent la construction d'un filtre encodant toutes les propriétés de la salle. Ces approches font l'objet de nombreuses recherches, notamment pour accélérer les calculs en vue d'une utilisation en temps réel.

LA RÉALITÉ SONORE AUGMENTÉE

Enfin, pour les situations de réalité virtuelle ne nécessitant pas un trop fort degré de cohérence entre le rendu sonore et visuel, on peut recourir à un modèle perceptif de l'effet de la salle, contrôlable par un ensemble de paramètres pertinents pour la perception, par exemple l'effet Doppler pour les sources en mouvement. Sans passer par une description exhaustive des propriétés du lieu, ce modèle permet notamment de déduire la durée de réverbération en fonction de données architecturales globales telles que le volume, et le rapport entre le niveau du son direct et le niveau de réverbération selon la distance entre la source et le récepteur.

La prise en compte de ces propriétés perceptives aide aussi à optimiser les algorithmes de simulation physique, ce qui est indispensable en cas de multiplicité des sources, faute de quoi les capacités de calcul des processeurs sont très vite dépassées. L'équipe de recherche REVES de l'Inria, par analogie avec des techniques de rendu graphique, exploite les propriétés de masquage auditif pour simplifier le traitement de la spatialisation sans dégradation du réalisme.

LA RÉALITÉ VIRTUELLE EST UN OUTIL ESSENTIEL À LA RECHERCHE SUR LA PERCEPTION, EN PARTICULIER AUDITIVE

L'intérêt grandissant pour les environnements immersifs et interactifs, y compris dans le domaine artistique, incite à replacer les questions de spatialisation du son dans le cadre plus large de l'interaction entre les sens visuel, auditif et proprioceptif. À ce titre, la reproduction holophonique et la reproduction binaurale couplées à un dispositif de suivi du mouvement sont privilégiées, car elles assurent la correspondance en continu entre les indices auditifs spatiaux et les mouvements d'un utilisateur.

Par exemple, depuis 2013, en partenariat avec France Télévisions, Radio France, Orange..., nous développons le projet BiLi (*Binaural Listening*) qui consiste à déployer des solutions d'écoute binaurale individualisée pour le grand public. L'idée est d'améliorer l'expérience personnelle sur les appareils personnels (tablette, smartphones...) qui constituent aujourd'hui l'essentiel des moyens d'écoute. Quatre défis ont dû être relevés: définir une méthodologie pour évaluer la qualité d'expérience des auditeurs; acquérir les filtres HRTF d'un individu; concevoir un standard correspondant à ces données HRTF individuelles; enfin, élaborer des processeurs d'écoute binaurale en temps réel et multiplateforme.

Les diverses technologies de spatialisation sonore que nous venons d'exposer témoignent de la vitalité des recherches dans ce domaine. Par ailleurs, il est intéressant de constater que les modèles ne précèdent pas toujours les technologies: si le formalisme décrivant la reproduction du champ acoustique précède de plus d'un siècle les premiers essais des systèmes WFS, *a contrario*, les premières réalisations de la stéréophonie précèdent les travaux qui en décrivent les fondements perceptifs. Le «théâtrophone» (*voir la figure page ci-contre*) de l'inventeur Clément Ader, qui permettait à Marcel Proust d'écouter par téléphone et en stéréo des retransmissions de théâtres parisiens, précède ainsi de vingt ans les travaux de Lord Rayleigh sur la localisation auditive!

De nos jours, la réalité virtuelle est à la fois un miroir de nos propres connaissances – on y expérimente le savoir qu'on y a injecté –, mais aussi un terrain d'approfondissement des connaissances, car elle permet de manipuler nos sens. Au-delà des applications artistiques, ludiques ou industrielles, la réalité virtuelle est un outil essentiel à la recherche sur la perception, en particulier auditive. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. HENDRICKX *ET AL.*, Improvement of externalization by listener and source movement using a «binauralized» microphone array, *JAES,* vol. 65, pp. 589-599, 2017.

A. ANDREOPOULOU ET B. KATZ, Identification of perceptually relevant methods of inter-aural time difference estimation, *The Journal of the Acoustical Society of America,* vol. 141, 3635, 2017.

N. TSINGOS ET O. WARUSFEL, Modèles pour le rendu sonore. Dispositifs et interfaces de restitution sonore spatiale, *in* Traité de la réalité virtuelle, P. Fuchs et G. Moreau, *Les presses de l'École des Mines de Paris,* 2005.

L'ESSENTIEL

- La harpe est un instrument complexe : le nombre de cordes important et les tensions qu'elles exercent influent sur le son de l'instrument. De plus, la vibration d'une corde entraîne celle de ses voisines.
- Ces divers phénomènes vibratoires sont étudiés par les physiciens qui en identifient les caractéristiques principales.
- Ils peuvent alors mettre au point des outils d'aide à la facture instrumentale, par exemple la carte d'admittance qui révèle le couplage entre les cordes et la table d'harmonie où elles sont fixées.
- Ils analysent également les interactions des doigts et des cordes, caractéristiques de chaque instrumentiste.

LES AUTEURS

FRANÇOIS GAUTIER
professeur au Laum (CNRS) et à l'École nationale supérieure d'ingénieurs du Mans.

JEAN-LOÏC LE CARROU
Maître de conférences à l'institut Jean-Le-Rond-d'Alembert (CNRS) de Sorbonne Université.

Dans les cordes d'une harpe

Selon un proverbe irlandais du XII^e siècle, tout gentilhomme devait avoir un coussin sur sa chaise, une femme vertueuse et une harpe bien accordée. Les physiciens peuvent aider… pour l'instrument.

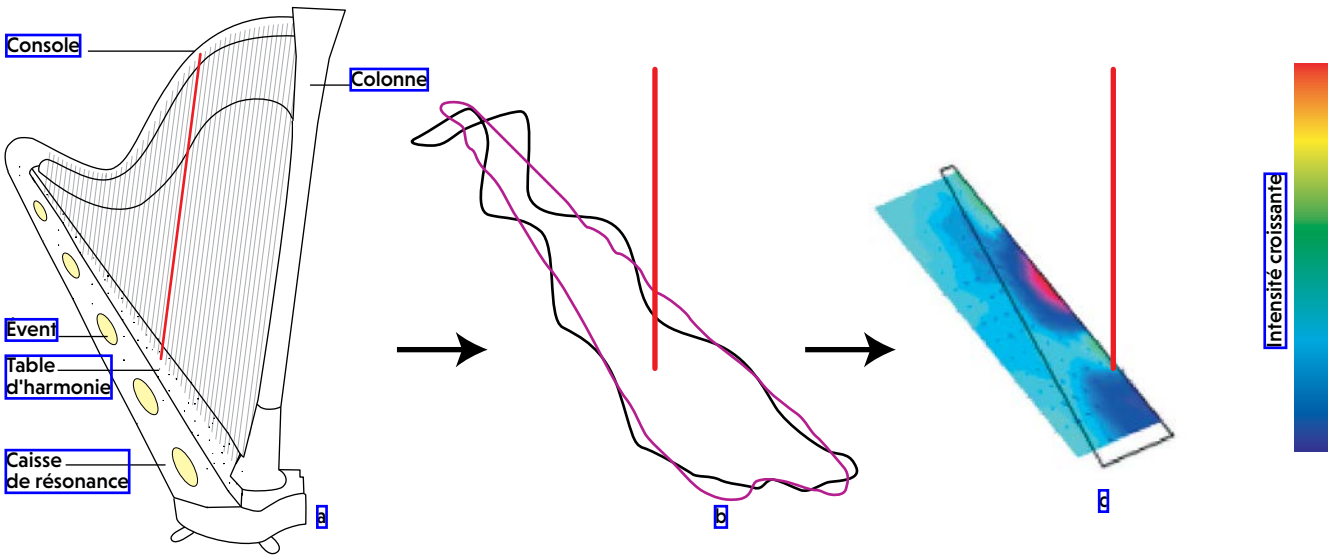
Le 9 mars 1967, un étrange instrument de « musique » est inventé… par Gaston Lagaffe dans le journal *Spirou*. Ce gaffophone tient plus de l'engin de démolition par les nombreux dégâts que ses vibrations ont entraînés que de la harpe dont il est pourtant une sorte d'avatar. Quelques amateurs se sont risqués à construire de vrais gaffophones, mais aucun n'a intégré d'orchestre symphonique, les harpistes préférant sans doute des instruments dont la qualité a fait ses preuves, notamment ceux de facteurs renommés.

DES GAFFOPHONES DE QUALITÉ

Ces instruments haut de gamme sont le plus souvent fabriqués de façon artisanale. Mais comment définit-on la qualité d'un instrument ? Il s'agit d'une notion globale qui recouvre le rendu sonore, l'expressivité ou la facilité de jeu, et associe des critères d'ergonomie, de solidité, de tenue dans le temps, notamment en ce qui concerne l'accord de l'instrument. Certains de ces attributs sont objectifs, d'autres reposent sur la perception subjective de l'instrument par l'auditeur. Pourtant, les implications économiques font de la qualité un enjeu majeur, car elle justifie souvent des différences de prix notables.

Les instruments de musique résultent d'un processus d'optimisation, par approximations >

© Alenavlad / shutterstock.com



La production d'un son avec une harpe se déroule selon plusieurs étapes : le doigt excite la corde *(a, en rouge)* qui communique son mouvement à la table d'harmonie *(b, en noir)* et crée un rayonnement sonore, visible sur la carte d'intensité acoustique *(c)*.

successives, sur lequel les contraintes économiques pèsent en permanence. Par exemple, aujourd'hui, les accords internationaux de protection de la faune et de la flore limitent entre autres les prélèvements de pernambouc (un bois brésilien) pour les archets ou de palissandre pour les guitares et les percussions. Pour contourner ces obstacles, les constructeurs ont besoin de matériaux alternatifs et d'innovations qui ne peuvent venir que d'outils scientifiques. Ils sont aussi nécessaires pour améliorer la compétitivité des entreprises artisanales. Cela place l'étude de la physique des instruments de musique au cœur d'un processus conduisant à une facture performante.

UN MODÈLE À CORDES

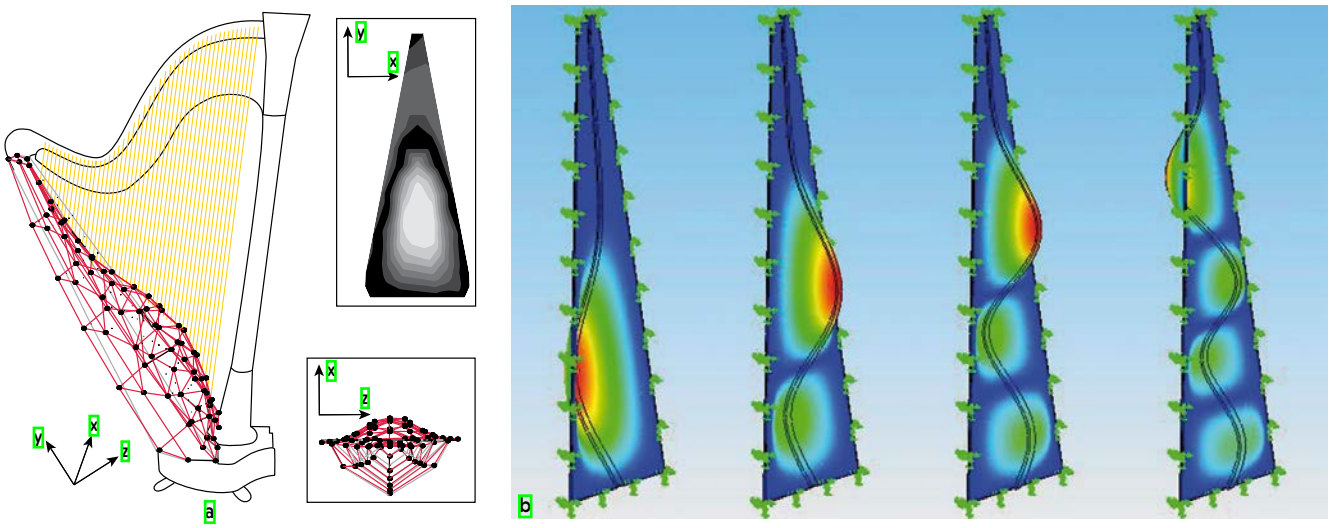
Les instruments à cordes sont classés selon la façon dont le son est produit : on distingue ainsi les instruments pour lesquels des sollicitations sont entretenues (la corde frottée du violon) et ceux à cordes libres qui peuvent être frappées (le piano) ou pincées (la harpe ou la guitare). Dans ce dernier cas, les oscillations résultent d'une perturbation de l'état initial et constituent un phénomène quasi périodique, s'amortissant avec le temps. Rappelons que les vibrations d'une corde sont la superposition de contributions élémentaires, nommées modes, dont les fréquences sont des multiples entiers d'une fréquence dite fondamentale. Chaque mode de vibration est doté de caractéristiques, tels sa fréquence propre et son coefficient d'amortissement qui traduit la rapidité avec laquelle la corde retrouve son état initial (avant pincement).

Le rôle du luthier est de concevoir un dispositif mécanique robuste qui transforme en son la vibration de la corde. En effet, la corde est, seule, quasi incapable de mettre en mouvement l'air, et ainsi de créer un son audible. Elle est donc associée à un système vibrant plan, une plaque nommée table d'harmonie (*voir la figure ci-dessus*). Cet élément a un rôle essentiel, celui du rayonnement acoustique, mécanisme par lequel la structure vibrante (principalement la table) transmet son mouvement à l'air environnant, mouvement ensuite propagé de proche en proche jusqu'à nos oreilles.

Cependant, pour une plaque seule, les rayonnements des deux faces créent des contributions presque opposées qui ont tendance à s'annuler. L'introduction d'une cavité diminue ce phénomène de court-circuit acoustique en réduisant le rayonnement de la face arrière de la plaque. Enfin, l'aménagement de trous dans cette cavité, des ouïes ou des évents, produit une résonance des basses fréquences qui augmente l'importance du champ rayonné dans ce registre de fréquences. La plupart des instruments à cordes sont construits sur ce modèle, dont nombre de paramètres sont ajustables par le luthier. Le choix de l'artisan est un équilibre entre son intuition et des règles issues de l'analyse du fonctionnement acoustique des instruments.

Examinons maintenant une harpe. Connue depuis l'Antiquité sous sa forme actuelle (elle est représentée sur un sceau sumérien), elle a néanmoins beaucoup évolué et donné lieu à de multiples modèles sur les différents continents selon la forme, la taille et le nombre de cordes. La grande harpe, ou harpe de concert, utilisée dans l'orchestre symphonique, est constituée de 47 cordes, fixées entre la console, en haut, et la table d'harmonie, en bas. Cette dernière est constituée d'une plaque faite généralement de bois d'épicéa, plus rarement en carbone,

© F. Gautier et J.-L. Le Carrou



L'analyse modale d'une harpe consiste à déterminer ses modes de vibration, c'est-à-dire les fréquences et les champs vibratoires associés. On identifie ainsi le champ vibratoire de l'instrument soit expérimentalement, comme ici pour le premier mode d'air, nommé mode de Helmholtz et noté A_0 *(a)*, soit numériquement pour les premiers modes de la table d'harmonie *(b)*.

recouverte d'un plaquage dont la composition exacte est à la discrétion du luthier.

Cette plaque, trapézoïdale, est renforcée par plusieurs raidisseurs et par une barre centrale métallique. L'arrière de la table est raccordé à une caisse de résonance tronconique, tandis qu'une colonne soutient la console à l'avant. La difficulté d'accorder l'instrument est connue, tant les tensions des cordes rendent l'équilibre mécanique précaire. Un jeu de sept pédales reliées à un système de tiges articulant près de 1 500 pièces mécaniques différentes permet de modifier la longueur vibrante de chaque corde, et donc sa fréquence fondamentale.

COUPLAGES SYMPATHIQUES

Autre particularité de l'instrument, les nombreuses cordes créent des résonances par sympathie : la vibration d'une corde donnée entraîne, essentiellement par couplage solide, c'est-à-dire *via* les points d'insertion des cordes et l'ensemble de l'instrument, la vibration de ses voisines selon des amplitudes variables. En effet, le couplage entre des cordes est d'autant plus grand qu'il existe des relations simples entre les fréquences mises en jeu : une corde excite facilement les cordes situées à l'octave (le rapport des fréquences de vibrations est égal à 2) ou à la quinte de l'octave supérieure (le rapport est de 3). Ces couplages sympathiques engendrent un phénomène de halo sonore, qui est une signature acoustique de l'instrument. Trop important, ce halo est gênant et peut rendre l'instrument injouable. Le luthier doit donc le maintenir dans une limite raisonnable.

Du fait de ces couplages sympathiques, parmi d'autres, les sons produits ont un grand nombre de composantes spectrales, dont les fréquences sont parfois proches. Un autre type de couplage est dû à l'existence de deux polarisations pour les cordes, correspondant à deux mouvements vibratoires, l'un dans le plan des cordes de la harpe et l'autre dans un plan perpendiculaire passant par la corde jouée.

Ces différents couplages donnent lieu à des phénomènes de battements et de décroissances multiples. De quoi s'agit-il ? Les battements sont des fluctuations lentes de l'amplitude du son dues à des interférences destructives et constructives entre des composantes spectrales de fréquences proches. Le phénomène de décroissance multiple apparaît quand plusieurs composantes du son sont amorties différemment : certaines sont dominantes au début du son, mais s'éteignent plus rapidement que d'autres, qui perdurent et sont dominantes à la fin du son (le son est alors dit rémanent). Voyons maintenant le mouvement vibratoire de la table d'harmonie, élément essentiel du rayonnement acoustique. L'analyse de la harpe a montré que, pour les premiers modes, ceux dont les fréquences propres sont les plus basses, le volume occupé par la caisse de résonance reste constant au cours de la vibration. Ces modes, sans grande importance acoustique, correspondent à des mouvements vibratoires de la caisse autour de ses points de fixation.

LES MODES DE L'INSTRUMENT

En revanche, les modes de fréquences plus élevées entraînent un mouvement de flexion important de la table d'harmonie et modifient le volume interne de la cavité ; ils engendrent un rayonnement acoustique notable. C'est le cas de deux modes nommés T_1 (le premier mode de la table, ou mode de table) et A_0 (le premier mode de l'air, aussi nommé mode d'air ou mode de Helmholtz). Les modes de table mettent en jeu principalement des vibrations de la table d'harmonie, tandis que les modes d'air correspondent à des mouvements >

importants des masses d'air situées au voisinage des évents ; on parle de pistons d'air.

Ces deux modes sont aisément identifiables sur une guitare : en bouchant l'évent avec un bloc de mousse, le mode A_0 disparaît ; en ajoutant un poids sur la table, la fréquence du mode T_1 est décalée vers les graves.

Le mode A_0 amplifie les basses fréquences, car il donne lieu à une résonance qui relève les niveaux acoustiques autour de sa fréquence. Cet effet, nommé bass-reflex, est utilisé dans certaines enceintes acoustiques. Son rôle est important dans le cas de la guitare classique, où les modes A_0 et T_1 ont des fréquences voisines respectivement de 100 et 200 hertz. Petite, la table d'harmonie de la guitare rayonne mal, c'est-à-dire de façon inefficace, les fréquences inférieures à environ 100 hertz, à cause du phénomène de court-circuit acoustique. Aussi, accorder A_0 à cette fréquence renforce le rayonnement de la guitare dans une plage de fréquences où la table seule fonctionne mal.

Si la résonance du mode A_0 est une caractéristique acoustique importante pour une guitare, qu'en est-il pour une harpe ? Des expériences lors desquelles on a bouché tous les évents et ajouté des masses sur la table d'harmonie d'une harpe ont permis d'identifier A_0 et T_1 à des fréquences d'environ 170 et 150 hertz. Comment cela se traduit-il ? L'effet bass-reflex est moins marqué que dans le cas de la guitare, car les phénomènes d'amortissement sont plus importants et la présence d'autres modes que A_0 et T_1 rend la réaction de la table plus complexe et masque l'effet. Et surtout, la fréquence de A_0 est trop élevée ! Dans la harpe, le rôle attendu de l'effet bass-reflex serait de compléter le rayonnement en basses fréquences de la table, là où le court-circuit acoustique est important. Pour cela, la fréquence de A_0 devrait être faible, et au moins inférieure à celle de T_1. Cette condition n'est pas remplie : la harpe n'utilise donc pas l'effet amplificateur que l'on pourrait attendre de A_0.

De fait, dans une harpe, les évents sont d'abord conçus pour faciliter… un accès aux cordes ! En outre, le voisinage des évents est modifié par la présence du corps de l'instrumentiste. Dans une harpe, l'effet bass-reflex n'est donc pas encore optimisé, ou plutôt le processus, opéré par l'histoire de la musique, est ici inachevé. Cela peut s'expliquer par le nombre de harpes fabriquées, qui est bien moins important que le nombre de guitares, pour lesquelles le processus d'optimisation est plus abouti. La harpe est donc un instrument en évolution.

Comment les cordes et la table sont-elles couplées ? Une image peut aider à répondre. L'énergie qu'une corde transmet à la table est comparable à l'eau d'un seau que l'on vide dans une mare. Quand le seau est vidé rapidement, la mare est agitée, ce qui traduit un couplage fort : la vibration et donc le son produit sont de grandes amplitudes, mais plutôt brefs. À l'inverse, quand le seau est vidé lentement, le couplage est faible : le son créé est modéré, mais dure longtemps.

Dans une harpe, ce degré de couplage est mesuré par l'admittance. Il s'agit du rapport, dans le domaine des fréquences, entre la vitesse vibratoire en un point (celle de son déplacement périodique selon un axe perpendiculaire au plan de la table) et la force appliquée pour entraîner cette vitesse. Ce paramètre dépend de la fréquence de la corde et de sa position sur l'axe où sont fixées les cordes : on peut donc représenter l'admittance sous forme d'un plan position/fréquence où les cordes sont notées par des points. Pour ces derniers, l'abscisse est la position du point d'attache et l'ordonnée, la fréquence fondamentale de la corde. L'ensemble de ces points constitue une trajectoire (*voir la figure page ci-contre*).

LA CARTE D'ADMITTANCE

Quelles informations en tire le luthier ? Les variations de l'admittance le long de cette trajectoire constituent un indicateur de l'homogénéité de l'instrument. Lorsque le long de la trajectoire l'admittance varie trop ou de façon chaotique, les conditions de couplage entre les cordes et la table sont alors très fluctuantes d'une corde à l'autre : certaines cordes sonnent trop, et d'autres trop peu. L'artisan en déduit alors les différences d'amplitude et de décroissance entre les cordes. Grâce à ces

LE DOIGT ET LA CORDE

Pour émettre un son, le musicien pince la corde de l'instrument. Cette opération, extrêmement répétable et caractéristique de chaque instrumentiste, est l'objet de recherche au sein de l'équipe Lutheries-Acoustique-Musique de l'institut Jean-Le-Rond-d'Alembert de Sorbonne Université. Dans cette première étape, l'interaction du doigt et de la corde joue un rôle essentiel, car l'instrumentiste contrôle de nombreux paramètres rendant l'excitation dépendante de sa morphologie. Pour la harpe de concert, le pincement de la corde s'effectue par la pulpe du doigt et peut se décomposer en deux étapes avant le lâcher. D'abord, le musicien tire la corde jusqu'à exercer une tension maximale, puis laisse glisser la corde sur sa première phalange. Cette façon d'attaquer la corde est caractéristique du son de chaque harpiste, ce qui rend possible l'identification de l'instrumentiste dès les premières notes jouées. Pour approfondir notre connaissance sur ce pincement et en caractériser les paramètres physiques discriminants, nous avons mis au point un modèle de cette interaction tenant compte du comportement viscoélastique du doigt, du frottement (similaire à celui d'un archet sur une corde de violon) ainsi que des paramètres de contrôle de l'instrumentiste. Le geste instrumental étant bref, nous avons obtenu les paramètres d'un

tel modèle à l'aide d'une caméra rapide et validé par un doigt robotisé paramétrable *(voir la figure ci-contre)*. Les déplacements du doigt et de la corde au cours du pincement ainsi mesurés, nous avons estimé les paramètres de l'interaction qui varient selon les instrumentistes, rendant compte de certaines différences acoustiques que l'on peut percevoir entre les musiciens. Là encore, le modèle physique permet d'éclairer le fonctionnement de l'instrument. Du point de vue de l'instrumentiste, le pincement ne s'arrête pas au bout de son doigt, c'est tout son corps qui y participe. Pour mettre en évidence les stratégies gestuelles des harpistes, nous avons analysé les mouvements de leurs membres et de leur corps par Motion Capture. Nous avons notamment pu montrer que le mouvement du poignet (lui aussi très répétable et spécifique de chaque instrumentiste) participe grandement à l'interprétation. Avec l'aide d'un modèle biomécanique du bras des harpistes, nous avons pu constater que les efforts articulaires développés par les instrumentistes pouvaient se répartir différemment le long du bras en fonction de l'expertise des instrumentistes et qu'ils s'avèrent très importants, notamment au niveau de l'épaule. Une modélisation du mouvement des instrumentistes couplée à celle de l'instrument peut aider à faire évoluer, à terme, la pratique instrumentale et l'ergonomie de l'instrument pour limiter, par exemple, l'apparition de certaines pathologies.

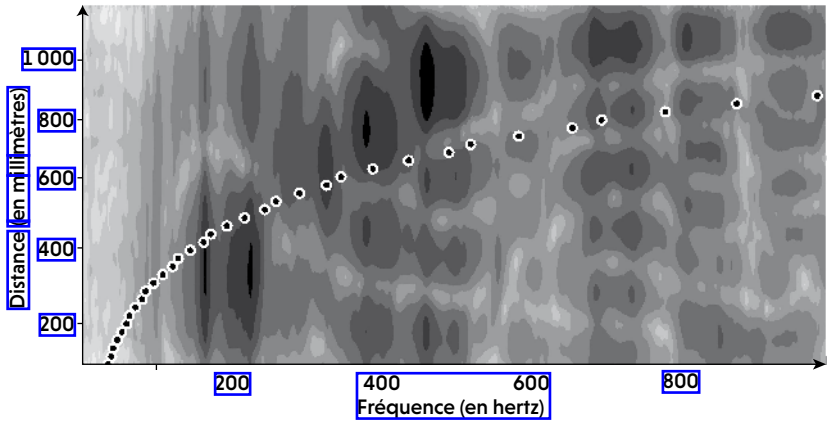
© J.-L. Le Carrou

renseignements, il peut diagnostiquer les notes donnant lieu à un son de forte amplitude, mais s'atténuant rapidement (couplage fort) ou un son d'amplitude plus faible, mais durant plus longtemps (couplage faible). Cette caractéristique, importante pour le musicien, est ainsi mesurée objectivement par des paramètres physiques pertinents.

Le luthier influe sur la carte d'admittance, sans le savoir, en modifiant la géométrie de la table et par le choix des matériaux. La trajectoire est quant à elle fixée par les fréquences de jeu et les positions des points d'accrochage.

Le physicien Chris Waltham, de l'université de Vancouver, au Canada, a développé une interprétation physique de cette carte d'admittance. La table d'harmonie est moins épaisse près de la console qu'à proximité du pied de la colonne. C'est pourquoi, parmi les « ventres » des différents modes de flexion de la table (les régions pour lesquelles le champ vibratoire de ce mode est maximal), celui qui est dans la partie supérieure de l'instrument (la plus souple) a une amplitude supérieure à celle de ses voisins. Ce ventre, plus marqué que les autres, est d'autant plus haut sur l'instrument que l'ordre de ce mode est élevé.

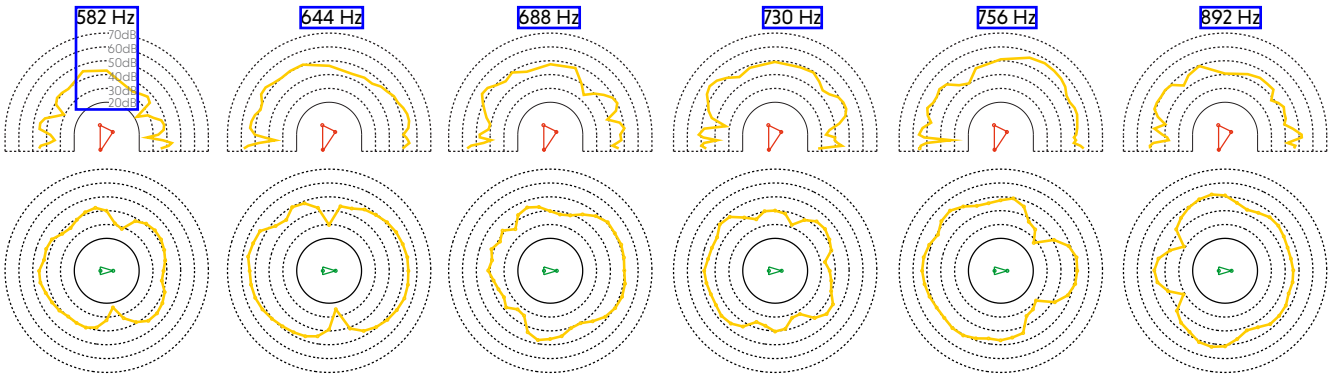
La carte d'admittance d'une table d'harmonie de harpe décrit le degré de couplage entre cordes et table *(plus il est fort, plus la zone est noire)*, qui dépend de la fréquence et de la position sur l'axe de l'instrument. Chaque corde est représentée par un point, dont l'abscisse est la fréquence fondamentale de la corde et l'ordonnée la position de son point de fixation.



© C. Waltham

DE L'UTILITÉ DES MONOPOLES

La carte d'admittance met en évidence ce résultat : quand la fréquence augmente, le nombre de ventres visibles augmente (un ventre pour une fréquence de 200 hertz et six à 850 hertz), les régions pour lesquelles l'admittance est la plus élevée (*les régions noires de la carte ci-contre*) correspondant aux ventres de grande amplitude. Du point de vue acoustique, ce phénomène a une conséquence importante en termes de directivité : plus la fréquence augmente plus le rayonnement acoustique de l'instrument présentera une certaine complexité avec de nombreux lobes de forte pression. Ce rayonnement acoustique de l'instrument peut être décrit à l'aide de sources élémentaires équivalentes nommées monopoles acoustiques. La répartition dans l'espace de ces monopoles révèle les zones actives de l'instrument, c'est-à-dire les sources acoustiques du système. Les études menées dans notre laboratoire montrent que les sources acoustiques équivalentes à l'instrument se déplacent vers sa partie supérieure et augmentent avec la fréquence.



Selon les fréquences, les vibrations d'une harpe *(en rouge, vue de profil en haut et, en vert, vue de dessus en bas)* se diffusent différemment dans l'air.

Mais que se passe-t-il à plus hautes fréquences, lorsque les modes ne sont plus discernables ? À partir de la carte d'admittance, il est possible d'exprimer un niveau moyen de couplage qui nous a permis d'identifier des stratégies différentes de fabrication des facteurs de harpes. Certains privilégient une faible mobilité de la table d'harmonie et de la caisse tandis que d'autres font l'inverse. Ces choix ont une conséquence sur l'acoustique des instruments, entraînant, *in fine*, des spécificités sonores propres à chaque fabricant. Nous avons aussi pu montrer qu'en suivant la production de deux grandes familles de facteurs du XVIIIe et XIXe siècle (la famille Cousineau et la famille Erard), leurs stratégies de fabrication ont évolué au cours des années allant vers une diminution de la mobilité de la table et de la caisse liée très probablement à l'augmentation du nombre et à la tension des cordes.

L'ingénierie mécanique a notablement évolué depuis cinquante ans grâce aux modèles numériques qui mettent en évidence les effets de modifications structurelles et évitent la construction de prototypes longs et coûteux à réaliser. La lutherie est en passe aujourd'hui d'utiliser ces outils pour guider ses évolutions.

FAIRE « CHANTER LES ÉQUATIONS »

Les artisans disposeront ainsi de prototypes virtuels dont la conception est assistée par ordinateur. Toutefois, la connaissance des caractéristiques mécaniques d'un instrument, qui sont les données qu'utilise ce type de modèle, n'est pas toujours aisée. En effet, les paramètres mécaniques du bois varient souvent selon les échantillons et dépendent en outre des conditions hygrométriques et thermiques. Les caractéristiques des liaisons mécaniques, tels les collages, ainsi que les précontraintes introduites dans l'instrument lors de la fabrication sont également difficiles à quantifier. Néanmoins, les informations fournies par ces modèles sont riches et révèlent des quantités physiques difficilement mesurables, comme les transferts ou les couplages entre certaines parties du système. Le prix à payer pour faire « chanter les équations » est le temps de calcul.

Les caractéristiques vibratoires et acoustiques d'un instrument sont utiles pour l'analyse de son fonctionnement. Ces caractéristiques sont accessibles *via* nombre d'outils, mais il s'agit le plus souvent d'instruments de laboratoire difficiles à mettre en œuvre chez les artisans luthiers.

Aujourd'hui, des outils métrologiques dédiés, à coût réduit, portables et robustes, associés à des interfaces en ligne permettant le calcul de paramètres acoustiques sont conçus pour répondre aux besoins de la profession. Cette démarche, nommée Pafi (Plateforme d'aide à la facture instrumentale) est développée au Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine (Laum) depuis plusieurs années, en particulier grâce à des projets d'élèves de l'École nationale d'ingénieurs de l'université du Maine (Ensim) en lien avec le pôle d'innovation de l'Institut technologique européen des métiers de la musique (Itemm) et les activités de l'Union nationale de la facture instrumentale (Unfi). Pour le luthier, plusieurs applications sont visées.

D'abord, l'établissement d'une sorte de carte d'identité technique, qui facilite la traçabilité des interventions tout au long de la vie de l'instrument. En cas de restauration ou de réparation, les comportements d'origine peuvent ainsi être retrouvés et l'on mesure la qualité d'une intervention, par exemple le revernissage. Ensuite, l'artisan s'assure de la reproductibilité d'un procédé de fabrication en archivant des fréquences modales à différents stades. Les outils métrologiques aident également au choix du matériau. Enfin, on peut confectionner des copies d'un instrument de référence, non pas uniquement en copiant sa géométrie, ses matériaux et son aspect, mais en reproduisant ses modes de vibration.

Comparer deux instruments peut alors s'effectuer au moyen d'une écoute des sons de synthèse dite hybride utilisant, d'une part, les modes mesurés d'un instrument et, d'autre part, un geste et des cordes connues numériquement.

Si Gaston Lagaffe avait eu vent de ces outils, son gaffophone n'aurait sans doute pas entraîné autant de dommages ! ■

Les auteurs remercient Vincent Doutant et Jakez François qui sont à l'origine de ces travaux sur la harpe de concert.

BIBLIOGRAPHIE

J.-L. LE CARROU *ET AL.*, 18th and 19th French harp classification using vibration analysis, *Journal of Cultural Heritage, Wooden Musical Instruments Special Issue,* vol. 27S, pp. S112-S119, 2017.

D. CHADEFAUX, *Interaction musicien/instrument : cas de la harpe de concert,* Thèse de l'université Pierre-et-Marie-Curie, 2012.

J.-L. LE CARROU *ET AL.*, Some characteristics of the concert harp's acoustic radiation. *Journal of the Acoustical Society of America,* vol. 127(5), pp. 3203-3211, 2010.

C. WALTHAM *ET AL.*, Vibrational characteristics of harp soundboards, *Journal of the Acoustical Society of America,* vol. 124 (3), pp. 1774-1780, 2008.

© J.-L. Le Carrou

CE MAGAZINE VOUS PLAÎT ?

OFFRE 1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

2 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓
Le *Hors-Série* papier (4 numéros par an)	✓	✓
L'accès en ligne illimité www.pourlascience.fr		✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)		✓
L'édition numérique du *Hors-Série* (4 numéros par an)		✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996		✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**79 €** Au lieu de ~~114,40 €~~	**99 €** Au lieu de ~~174,40 €~~
VOTRE RÉDUCTION	**– 31 %**	**– 43 %**

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

☑ **OUI, je m'abonne pour 1 an à POUR LA SCIENCE**

1 / JE CHOISIS MA FORMULE (merci de cocher)

☐ FORMULE **INTÉGRALE**
- 12 nos du magazine papier
- 4 *Hors-Séries* papier
- Accès illimité aux contenus en ligne

99 € Au lieu de ~~174,40 €~~ — TIA99E

☐ FORMULE **PAPIER + HORS-SÉRIE**
- 12 nos du magazine papier
- 4 *Hors-Séries* papier

79 € Au lieu de ~~114,40 €~~ — TIA79E

Par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2018 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter boutique.pourlascience.fr.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour La Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : https://rebrand.ly/charte-donnees-pls Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

PAG18STDDOS

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme
Nom : ..... Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal ..... Ville : .....
Téléphone .....

Email : (indispensable pour la formule intégrale)
..... @.....
J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ **Par chèque** à l'ordre de Pour la Science
☐ **Carte bancaire**
Numéro .....
Date d'expiration ..... Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) .....

Signature obligatoire :

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32 000 € – RCS Paris B 311 797 393 - Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

PLUS SIMPLE, PLUS RAPIDE
ABONNEZ-VOUS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

FAIRE VIBRER LA CORDE SENSIBLE

Depuis l'Antiquité, les vertus de la musique sur l'esprit sont réputées. Et l'on redécouvre aujourd'hui qu'elle favorise le développement de nombreuses capacités cognitives, telles le raisonnement abstrait, la concentration, la créativité… En d'autres termes, la musique rend plus intelligent !
Les bienfaits de la musique sont aussi utilisés dans le cadre de thérapies contre l'anxiété, la dépression, l'autisme, les troubles du comportement…
Les mécanismes sous-jacents à ces divers effets de la musique sont de mieux en mieux connus, notamment grâce à l'imagerie cérébrale.
Ces techniques ont également révélé les bases du plaisir et de l'émotion procurés par l'écoute d'une musique. De là à expliquer ce qu'est la beauté… Non, cette fois, c'est à la philosophie de répondre.

© D'après Rafi Hemisch / GettyImages

LA MUSICOTHÉRAPIE

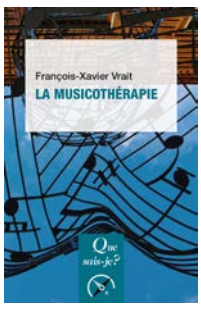
François-Xavier Vrait

Depuis l'Antiquité, on connaît les bienfaits de la musique. Ils sont au cœur d'une discipline en plein essor, la musicothérapie. Elle est le sujet du livre de François-Xavier Vrait. Extraits.

BIO EXPRESS

Président fondateur de la Fédération française de musicothérapie.

Directeur de l'institut de musicothérapie, à la faculté de médecine de Nantes.



« Que la musique ait des effets sur l'être humain, nous en avons tous fait l'expérience, que nous soyons amateur de musique, mélomane averti, chanteur occasionnel ou instrumentiste confirmé.

Ce pouvoir de la musique est bien connu et utilisé depuis longtemps. Les chants de travail avaient pour fonction de régler le rythme d'une tâche collective en assurant la cohésion du groupe des travailleurs, tout en leur donnant "du cœur à l'ouvrage". C'est au son des tambours et des marches militaires que des troupes entières sont parties gaillardement à la guerre. Plus récemment et dans un but commercial, les publicitaires ont bien compris comment un fond musical approprié module le déplacement des clients et les amène à flâner tranquillement dans les rayons des hypermarchés, ou à accélérer la cadence quelques minutes avant l'heure de la fermeture. Dans un autre domaine, la musique permet de supporter des situations potentiellement anxiogènes, comme dans les ascenseurs ou les salles d'attente. Le champ est vaste des utilisations possibles de ces "techniques psychomusicales", et de nombreux travaux étudient le pouvoir des sons musicaux, non seulement chez l'humain mais aussi en multipliant les expérimentations auprès des animaux et des plantes.

Il ne nous viendrait pas à l'idée de parler de "musicothérapie" pour définir cet usage fonctionnel de la musique. En revanche, la question se pose de façon plus subtile lorsque nous évoquons les bienfaits de la musique et ses effets positifs sur notre comportement ou notre ressenti. "La musique me fait du bien." "Lorsque je chante je retrouve mon énergie, ma joie de vivre." "Écouter un CD me

détend, me relaxe, m'apaise." "Je ressens mon corps tout entier, vivant et traversé par les vibrations de la musique techno." "Depuis que je fais de la guitare et apprends le solfège, j'ai de bien meilleurs résultats au collège." "Certains passages de Fauré me conduisent au bord des larmes, et je me sens comme rempli de moi-même." "Je suis entraîné par le rythme de la musique et ne ressens plus mes douleurs." "La musique me stimule et m'aide à me dépasser." Devons-nous considérer comme de la musicothérapie toutes les situations dans lesquelles la musique produit un effet souhaitable, bénéfique, conduisant à un mieux-être? Comment définir la musicothérapie?

Le terme est entré dans le supplément du Nouveau Larousse illustré en 1907. Le même Petit Larousse, en 2017, indique: "nom féminin. Utilisation de la musique dans un but de thérapie psychique". Même concision pour Le Dictionnaire Larousse de la musique: "Art de guérir les maladies par la musique." De même pour le Petit Robert de la langue française (2016): "Traitement médical d'affections nerveuses, psychiques, par la musique." L'essentiel y est: c'est un procédé de soins ("traitement médical, art de guérir") qui utilise la musique. Il s'adresse expressément aux "affections nerveuses, psychiques", encore que l'expression "thérapie psychique" reste plus ambiguë: est-ce le traitement de troubles psychiques ou l'emploi de moyens psychologiques pour y parvenir? Cependant, le contexte est clairement énoncé: la musicothérapie se situe dans un cadre médical et la musique en constitue l'outil thérapeutique.

[...] Dans les années 1960-1970, un premier centre français de musicothérapie fut créé, à Paris, sous le nom d'Association de recherches et d'applications des techniques psychomusicales (ARATP). L'équipe est rassemblée autour de Jacques Jost, un technicien du son à l'ORTF qui va engager, à partir de 1954, des expérimentations sur les effets thérapeutiques de l'audition musicale, en collaboration notamment avec une clinique psychiatrique en région parisienne. Dans ce contexte d'hospitalisation privée, Jacques Jost se voit confier des patients souffrant majoritairement de troubles anxieux, d'hyperémotivité, mais surtout de pathologies de l'humeur, principalement des états dépressifs aigus ou chroniques, des accès mélancoliques évoluant dans le cadre de psychoses maniaco-dépressives ou de schizophrénies. Il va développer un protocole de musicothérapie réceptive en réponse aux variations de l'humeur qu'il observe chez ses patients. Il adopte donc une logique médicale simple: maladie > traitement > retour à la santé; ou autrement dit: symptôme > médicament > sédation du symptôme. L'audition musicale a pour objectif de modifier l'état psychique de la personne. Il s'agit en quelque sorte d'utiliser la musique comme un médicament, et d'évaluer l'humeur du patient avant et au terme de la séance.

Dès lors, la question se pose de la sélection des œuvres musicales à écouter. Se satisfaire de la seule subjectivité du thérapeute pour arrêter un choix ne semble pas envisageable. Il faut donc s'appuyer sur une démarche plus rationnelle. Jost va asseoir ses expériences sur deux axiomes, desquels découle toute sa pratique clinique.

D'une part, il émet le postulat selon lequel la musique détient en elle-même un pouvoir et produit des effets que le thérapeute doit connaître: ce sont des effets sur le corps (effets psychophysiologiques) et sur le psychisme (effets psychoaffectifs). Un traitement statistique de la réaction des sujets à l'écoute de telle ou telle musique peut répondre aisément à ce premier présupposé, et l'équipe de l'ARATP organise des rendez-vous réguliers au siège de l'association, ouverts à toute personne volontaire qui devra répondre à un questionnaire après avoir entendu des extraits musicaux. Un fichier est ainsi progressivement constitué, collectant méthodiquement un répertoire d'œuvres à utiliser, et notifiant précisément ce que le musicothérapeute peut espérer comme amélioration de l'état du patient (apaisement, dynamisation, modification thymique, etc.). Ce traitement statistique est étayé par des recherches menées aux États-Unis sur le pouvoir affectif de la musique, ayant mis en évidence sa capacité à modifier sensiblement l'état émotionnel d'un sujet, la stabilité de l'effet dominant d'une même musique d'une audition à l'autre et le fait que les réponses affectives sont généralement uniformes d'un sujet à l'autre.

L'autre postulat veut que chaque personne écoute et reçoive la musique en fonction de son état affectif. Cette deuxième affirmation repose sur le constat qu'une personne déprimée, par exemple, ne pourra se sentir en sympathie qu'avec une musique aux accents tristes, alors qu'une personne en état d'exaltation ou d'euphorie répondra plus facilement à l'appel d'une musique enjouée, plutôt rythmée.

La musicothérapie se situe dans un cadre médical et la musique en constitue l'outil thérapeutique

En cohérence avec ce paradigme, Jost imagine une méthodologie reproductible à chaque séance, composée d'une succession de trois extraits musicaux.

Le premier extrait tente de refléter l'état psychologique du patient avant ou au début de la séance. Cette musique cherche à entrer en résonance avec les aspects pathologiques et à les exprimer, afin que la personne puisse s'y reconnaître. Le deuxième extrait vient en quelque sorte neutraliser ces ressentis morbides et préparer la troisième audition, que Jost décrit comme une œuvre thérapeutique: "La troisième œuvre doit réaliser l'action recherchée."

[...] *Un exemple actuel de musicothérapie fonctionnelle*. Une entreprise française commercialise depuis plusieurs années un procédé de "soin par la >

musique", sous la forme d'une application numérique téléchargeable. Le client peut sélectionner un programme musical de son choix parmi une liste proposant des styles variés (il s'agit de compositions originales de texture classique, jazz, musique orientale, flamenco, etc.). Il est invité à s'installer confortablement, à mettre un casque audio, à "respirer calmement et se laisser guider par la musique". La méthode est décrite comme "une technique de relaxation musicale personnalisée basée sur les principes de l'hypnoanalgésie. La construction de ce schéma offre une séance de relaxation complète, comprenant trois phases : une première phase représentant votre état de conscience, vous amenant progressivement à une modification de celui-ci pour arriver à une phase de relaxation (deuxième phase), puis une reprise progressive de l'état de conscience (troisième phase ou phase d'éveil)".

Cette méthode, dite "séquence en U", est une reprise à l'identique de la technique des trois œuvres de Jost. Les progrès technologiques permettent dorénavant au patient de bénéficier de l'application à son domicile et de manière autonome, même si le plus souvent la proposition est faite par les professionnels de santé d'un établissement médical. En effet, la méthode est préconisée "dans le contexte de la prise en charge de la douleur et de ses composantes émotionnelles associées (anxiété, dépression, troubles du comportement et difficultés sociales)". Il s'agit d'une technique psycho musicale qui ne requiert pas la présence d'un thérapeute : la fonctionnalité musicale est recherchée pour elle-même, la musique est utilisée pour ses effets, son pouvoir générateur de mieux-être, inducteur de changements psychoaffectifs et comportementaux.

[...] La musicothérapie ne peut se développer dans l'ignorance des racines sur lesquelles elle s'est construite et continue à s'édifier. Le système modal qui fut longtemps un repère pour les praticiens n'a plus cours aujourd'hui. Et pourtant, même si les registres mineur et majeur constituent aujourd'hui les deux seuls modes de notre musique tonale, attribuer un sentiment de tristesse à une musique mineure ou un affect joyeux à une pièce en majeur revient à utiliser la fonctionnalité de la musique

© ermess/shutterstock.com

En Italie, la tarentelle est à l'origine une danse ou une série de musiques exécutées pour parvenir à faire sortir le malade (mordu par une tarentule) de sa torpeur, le faire entrer dans un processus de transe et le ramener à son état normal.

afin de provoquer une modification comportementale. Lorsqu'il cherche à ouvrir un canal de communication avec un patient mutique, prostré, dépressif ou autiste, le musicothérapeute est sensiblement dans le même positionnement que le musicien exécutant une tarentelle. De même, il sait interroger la force et la pertinence des rituels qui entourent et structurent les dispositifs groupaux de ses séances.

Notre musicothérapie contemporaine se situe à la confluence et sous l'influence de ces diverses origines. Tout autant, elle se laisse questionner, bousculer et remettre en cause, afin de pouvoir évoluer comme elle l'a toujours fait, en phase avec les remaniements anthropologiques et les progrès technologiques de son temps. En ce qui concerne ces dernières décennies, elle bénéficie en l'occurrence des remarquables avancées sur le plan des sciences humaines et de la médecine.

Une autre période s'ouvre avec le passage d'un siècle à l'autre. Les considérables progrès dans le domaine de l'imagerie médicale en constituent la principale raison. L'IRM (imagerie par résonance magnétique) fonctionnelle permet désormais de localiser de manière extrêmement précise l'activité de chaque partie du cerveau en "temps réel" : il devient dès lors possible de visualiser sur écran les aires cérébrales qui sont activées en relation directe avec une stimulation sensorielle, et par conséquent d'avoir une vision globale et détaillée de l'activité du cerveau, de façon à la fois diachronique et synchronique. Évidemment, les applications sont immenses, notamment dans le domaine des apprentissages, de la cognition, de la pédagogie, mais aussi sur le terrain médical, psychologique et thérapeutique.

[...] Le défi contemporain concernant la musicothérapie n'est plus tant sa définition, sa pertinence et sa spécificité dans le champ du soin, de la relation d'aide, de l'accompagnement, du soutien psychologique, que la reconnaissance du métier de musicothérapeute parmi les professions de santé. À cet égard, les situations sont très diverses selon les pays, et c'est pourquoi la Confédération européenne de musicothérapie (EMTC) s'attelle à penser et à construire une cohérence au niveau européen, en ce qui concerne la réglementation internationale de la profession, la formation et la protection du titre de musicothérapeute. Musicothérapeute : un métier en devenir ?

Tous les papiers se recyclent,
alors trions-les tous.

C'est aussi simple à faire qu'à lire.

La presse écrite s'engage pour le recyclage
des papiers avec Ecofolio.

ecofolio

Quand la musique est bonne

Personne – ou presque – n'est insensible au pouvoir de la musique. Nous passons en moyenne plus de deux heures par jour à en écouter. Probablement parce que notre cerveau établit un pont entre son et émotion.

Selon un sondage de la Sacem réalisé en 2014, 99 %, soit presque tous les Français, écoutent de la musique et trois quarts d'entre eux ne pourraient pas s'en passer. La musique met 92 % des Français de bonne humeur et pour 85 % d'entre eux, elle donne de l'énergie. Pour 94 %, elle évoque des souvenirs, et est appréciée dans ses différents styles, en fonction de son humeur. Aujourd'hui, la musique est « consommée » partout dans nos sociétés et, selon le même sondage, le temps moyen d'écoute par jour des Français est de 2 h 25. Mieux: au-delà de nos frontières, les études anthropologiques révèlent que toutes les cultures humaines pratiquent et écoutent de la musique. Alors, la musique est-elle universelle?

© Smith Collection/Gado / Getty Images

Un bonheur irradiant. Ray Charles incarnait l'émotion musicale, qui transfigurait son attitude et ses mimiques.

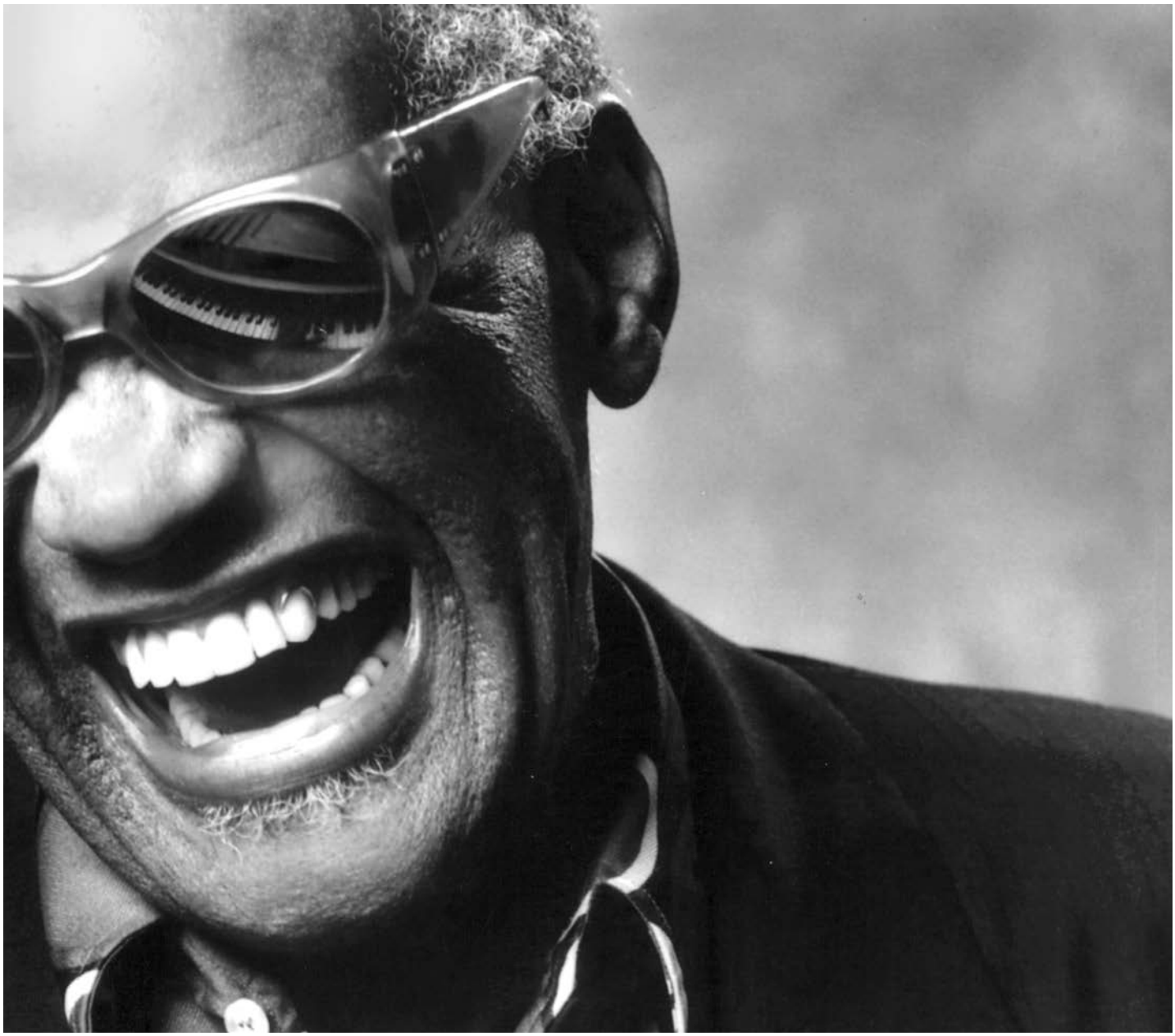
L'ESSENTIEL

- Tout le monde aime écouter de la musique sauf… certains chez qui l'émotion et la perception des sons semblent dissociées.
- Notre cerveau traite la musique au moyen de « modules » perceptifs et émotionnels. Le plaisir musical résulte de la mise en relation de ces modules.
- Les expériences musicales de l'enfance favorisent cette connexion, tout comme l'écoute régulière et l'apprentissage d'un instrument.
- Le « grand frisson » musical quant à lui se construirait à partir d'une expertise musicologique et d'un sens esthétique situé au-delà de l'affect brut.

LES AUTEURS

HERVÉ PLATEL
est professeur de neuropsychologie à Inserm à l'université de Caen.

SÉBASTIEN BOHLER
est rédacteur en chef du magazine *Cerveau & Psycho*.



C'est ici que les pistes se brouillent. Car l'universalité suppose l'existence de points communs. Or, si pour nous Occidentaux, le terme « musique » semble bien défini, au Tibet le terme « n'ga-ro » désigne toute émission sonore, qu'elle soit « musicale » ou non, et aucun mot n'existe pour décrire le champ que nous associons à la musique. Dans de nombreuses langues africaines, le terme « musique » n'existe pas, ni le terme générique pour « mélodie » ou « rythme ». Le mot « musique » n'a pas d'équivalent non plus en arabe yéménite de même qu'en arabe classique, du moins pas avant le XX^{e} siècle. L'ethnomusicologie et l'anthropologie nous montrent l'impossibilité d'une définition universellement satisfaisante de la musique (*voir Un anthropologue au pays de la musique, par V. Stoichita, page 40*).

DE L'ÉMOTION !

Et pourtant, nous aimons tous la musique. Voilà donc peut-être le dénominateur commun de toutes les musiques : l'émotion. La musique nous apporte de l'émotion de manière large et consensuelle. De fait, plus de trente années de recherche ont révélé que les émotions éprouvées par diverses personnes face à la musique sont très semblables. Dans une culture donnée, la plupart des gens répondent de la même façon à la question : trouvez-vous cette mélodie gaie ou triste ? En outre, ils se fondent sur les mêmes indices musicaux, à savoir le « mode » et le tempo. Ils trouvent gaie une musique jouée sur un mode majeur (la *Petite Musique de nuit* de Mozart…) et triste une musique jouée sur un mode mineur (*Tristesse* de Chopin…). Les musiques rapides (au tempo élevé) sont perçues comme gaies et celles au tempo lent comme plus tristes.

Même constat dans des cultures éloignées. En 2009, le neuroscientifique allemand Thomas Fritz s'est rendu au Cameroun pour rencontrer les Mafa, peuple des montagnes qui n'avait alors jamais entendu de musique occidentale. Il leur a fait écouter des morceaux pour piano qui, pour des oreilles européennes, expriment la gaieté, la tristesse ou l'angoisse. Ensuite, il leur a montré des visages exprimant ces émotions tout en leur demandant d'indiquer l'expression correspondant à chaque extrait musical… Les Mafa ont alors désigné, sous ses yeux, le visage triste pour la musique triste, le visage gai pour la musique gaie, le visage apeuré pour la musique effrayante…

Universalité des émotions ? Peut-être, mais dans certaines limites fixées par la culture. Car si les Mafa identifient aisément la joie (d'après Thomas Fritz, parce que ces musiques ont un tempo rapide et qu'elles s'insèrent surtout dans les moments joyeux de la vie sociale), l'identification de la peur ou de la tristesse reste moins fiable – car il serait peu approprié pour un Mafa d'associer la musique à des événements tristes de l'existence.

Comment l'émotion prend-elle forme dans notre cerveau quand nous écoutons de la musique ? D'une part, notre cerveau perçoit les sons et les analyse, d'autre part, il leur confère une résonance émotionnelle. Deux grandes régions cérébrales sont dévolues à chacune de ces actions (*voir la figure page 98*), auxquelles il faut ajouter une troisième composante d'interprétation qui sera évoquée ultérieurement.

SONS ET SENTIMENTS

Il faut donc supposer une connexion entre les modules de perception et d'émotion, connexion qui pourrait aussi bien se former au contact de la musique qu'être altérée par des dommages cérébraux. De fait, c'est ce que l'on constate chez certains cas cliniques. Le neurologue Bernard Lechevalier et ses collaborateurs à Caen ont examiné, en 1984, le cas d'une patiente qui, à la suite d'une méningite à pneumocoques ayant causé de vastes lésions des lobes temporaux, ne pouvait plus identifier des bruits courants – verre brisé, vent dans les arbres, moteurs de voitures. Elle ne comprenait plus le langage parlé, ne reconnaissait plus les mélodies, n'identifiait plus les rythmes, ne pouvait préciser si un son était grave ou aigu, ne savait pas si un morceau était du tango ou des chants grégoriens. Et pourtant… elle continuait à écouter la radio ou ses anciens disques, et à y prendre du plaisir !

L'EXPÉRIENCE DU FRISSON MUSICAL N'EST PAS INNÉE, MAIS SE CONSTRUIT AU FIL DE L'ENFANCE, AU CONTACT DES PREMIÈRES MÉLODIES

Le phénomène inverse existe aussi. Un patient percevait les sons sans difficulté, comprenait le langage parlé et les paroles des musiques, il savait distinguer les bruits courants, mais la musique ne lui procurait plus aucun plaisir et lui était même devenue désagréable. Il éprouvait en outre de la difficulté à reconnaître les airs familiers et n'arrivait plus à chanter, à localiser les sons dans l'espace ou à suivre leurs déplacements.

Même si de tels cas sont rares, ils montrent que, si la perception des sons et l'émotion sont le plus souvent connectées, la courroie de transmission entre l'une et l'autre peut se distendre ou se rompre. C'est bien le signe que le cerveau doit établir un pont entre ces deux fonctions centrales.

© Thomas Fritz / Max Planck Institut Tübingen

Des peuples ne connaissant pas la musique occidentale *(ici, les Mafa du Cameroun)* ressentent pourtant des émotions similaires aux nôtres en découvrant des extraits de… piano pour films muets.

Première conséquence : le plaisir musical ne serait pas « inné ». L'équipe du neuroscientifique Robert Zatorre, de l'université McGill, à Montréal, a montré pour la première fois l'existence, chez des personnes sans aucun trouble neurologique ou psychiatrique, d'une absence complète de plaisir musical nommée « anhédonie musicale ». Ces individus ne rencontrent aucun problème dans leur vie de tous les jours, y compris pour ressentir du plaisir en mangeant, en gagnant de l'argent ou en ayant des relations sexuelles. Simplement, ils n'éprouvent aucun plaisir en écoutant de la musique. Même s'ils savent très bien identifier et nommer les titres de chansons ou de morceaux qu'ils entendent, reconnaître si ces morceaux expriment de la joie, de la nostalgie ou quelque autre émotion (ils ont d'ailleurs une vie émotionnelle normale), force leur est d'admettre qu'ils n'éprouvent pas de plaisir à l'écoute d'extraits de musique. Plus encore : les manifestations classiques de l'émotion au niveau du corps (légère sudation, variations du rythme cardiaque) sont absentes.

L'INSENSIBILITÉ À LA MUSIQUE

La raison de cette anhédonie musicale a été identifiée en 2016, toujours par le même Robert Zatorre, associé à des chercheurs barcelonais. Ils ont étudié 45 individus présentant une telle anhédonie musicale, et ont observé grâce à des techniques de neuro-imagerie que la connexion reliant la zone de perception des sons dans leur cerveau (le cortex auditif) à celle qui fait éprouver du plaisir (le noyau accumbens) était anormalement faible.

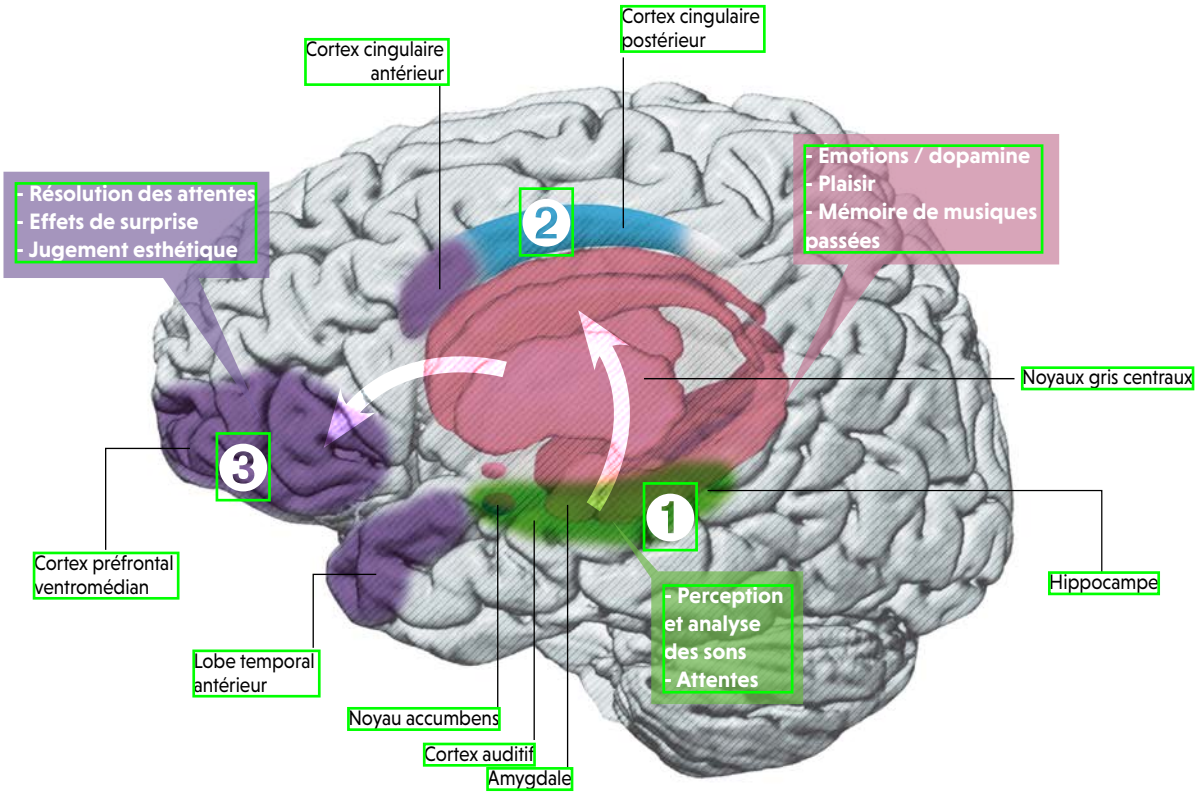
La construction du plaisir musical est plus complexe que celle du plaisir lié aux besoins basiques, tels le sexe ou la nourriture, et nécessite un dialogue entre ces différentes régions. Les personnes « anhédoniques musicales » n'auraient pas pu mettre en place les bases de ce dialogue entre perception, mémoire et plaisir dans leur cerveau. Elles auraient donc une compréhension « intellectuelle » des émotions musicales, mais sans les éprouver, et sauraient distinguer une musique joyeuse ou triste par sa structure rythmique et mélodique ; comme certaines personnes autistes qui distinguent les visages joyeux et tristes sur la base de l'orientation des traits faciaux, mais qui n'éprouvent aucune empathie émotionnelle face à ces mimiques…

L'ÉDUCATION AU PLAISIR

Contrairement à l'image d'Épinal du plaisir musical comme un fait naturel et universel, les recherches en neurosciences de la musique nous forcent donc à reconsidérer les liens entre musique, émotion, jugement esthétique et plaisir. L'expérience du fameux frisson musical n'est pas innée, mais s'est construite durant l'enfance grâce au renforcement de situations que nous avons pu trouver agréables ou satisfaisantes. Le jeune enfant entendant ses premières chansons ou comptines y associe des moments de bonheur qui contribuent probablement à renforcer la connexion entre son cerveau affectif et son cerveau perceptif. Manifestement, certains sujets adultes n'éprouvent pas ou peu d'émotions à l'écoute de musique, et cela sans anomalie neurologique claire qui pourrait l'expliquer.

Une des questions les plus passionnantes aujourd'hui est de savoir en quoi consiste ce lien entre notre perception des sons et la mise en action de nos émotions profondes. Il ne suffit pas d'entendre pour vibrer. Encore faut-il que la musique soit décodée ; que sa structure, sa mélodie et son rythme soient analysés à la fois par les parties de notre cerveau qui entendent et par celles qui décomposent, comparent la hauteur des sons, effectuent des rapprochements avec les mélodies déjà en mémoire. Ainsi, les sujets présentant une amusie congénitale (incapacité à distinguer la hauteur des sons) sont rarement « touchés » émotionnellement par la musique, car les difficultés qu'ils rencontrent généralement dans la perception de la hauteur sonore ne leur permettent pas, par exemple, de construire une représentation fidèle et distinctive des mélodies.

Voilà qui nous amène à distinguer au moins trois niveaux d'expression du plaisir musical. Au premier niveau se situe le plaisir primaire de l'expérience sonore. Les instruments de musique produisent des ondes sonores dont les vibrations stimulent l'ensemble du corps, en particulier les récepteurs tactiles de la peau, mais aussi les récepteurs internes des viscères. Cette expérience sensorielle physique et viscérale suffit à déclencher une émotion, même sans construction perceptive élaborée. Le deuxième niveau >



Perception et émotion. Dans le cerveau, le cortex auditif *(1)* perçoit et analyse les sons, en anticipant leur développement. Les noyaux gris centraux et l'hippocampe *(2)* suscitent l'émotion et mobilisent les souvenirs. Les zones plus frontales *(3)* notent si nos attentes sont confirmées ou déjouées, tout en prenant conscience de notre état affectif.

© Raphael Querue

représente le fameux frisson musical, capacité à mettre en relation une expérience perceptive présente avec des représentations stockées en mémoire : tel morceau nous fera vibrer parce qu'il active des traces de mélodies en partie similaires, au moins par fragments, qui ont déjà été mémorisées et associées à des émotions. Ce plaisir est étroitement lié au décodage perceptif réalisé par le cortex auditif et à la mémoire des expériences déjà éprouvées en musique.

LA CHAIR DE POULE DU MÉLOMANE

La musique entendue peut être alors familière, réminiscente de situations plaisantes qui permettent d'en anticiper le déroulement, ou bien totalement nouvelle – mais là encore notre cerveau forme des attentes en fonction de ce qu'il connaît, schémas ou scénarios possibles qu'il a déjà expérimentés dans d'autres situations d'écoute musicale.

Les situations d'attente sont particulièrement génératrices d'émotion et de plaisir, car on sait aujourd'hui que le circuit cérébral « de la récompense » libère de la dopamine non seulement lorsqu'il obtient une gratification, mais tout au long du processus d'attente – et y compris d'incertitude – qui le précède. Lorsque les attentes sont satisfaites, ou au contraire déjouées, le plaisir qui en découle peut déclencher « la chair de poule ». Ce deuxième niveau ne nécessite aucune expertise dans le domaine de la musique, mais il implique une imprégnation à cet art, et notamment des expériences musicales répétées pendant l'enfance.

Enfin, à un troisième niveau se développe le plaisir musical que nous pourrions qualifier de « plaisir de l'expert » ou du mélomane. De même principe que le frisson, et se confondant parfois avec lui, il naît de la satisfaction de décrypter la construction d'une pièce musicale, tout comme l'expert en peinture éprouve de l'intérêt et de l'émotion pour une œuvre « en rupture » ou techniquement exceptionnelle, dimensions qui ne sont pas accessibles sans une éducation formelle préalable. Ce plaisir esthétique est donc culturellement construit, et n'a rien à voir avec une transmission innée de l'émotion par la musique. Est-il du registre de l'émotion ? Pas nécessairement, mais il comporte certainement la possibilité d'une « récompense » au sens cérébral du terme. Bien évidemment, ces trois dimensions ne sont pas exclusives et l'auditeur d'un concert peut espérer faire l'expérience des trois simultanément. C'est d'ailleurs une des joies les plus rares qu'offre la musique : nous faire connaître simultanément l'émoi viscéral et les délices de l'intellect. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. MARTÍNEZ-MOLINA *ET AL.*, Neural correlates of specific musical anhedonia, *PNAS*, vol. 113(46), pp. E7337-E7345, 2016.

C. CLARK *ET AL.*, Music Biology: All This Useful Beauty, in *Current Biology*, vol. 24, pp. 234–237, 2014.

E. MAS-HERRERO *ET AL.*, Dissociation between musical and monetary reward responses in specific musical anhedonia, in *Current Biology*, vol. 24, pp. 699-704, 2014.

T. FRITZ *ET AL.*, Universal recognition of three basic emotions in music, in *Current Biology*, vol. 19, pp. 573-576, 2009.

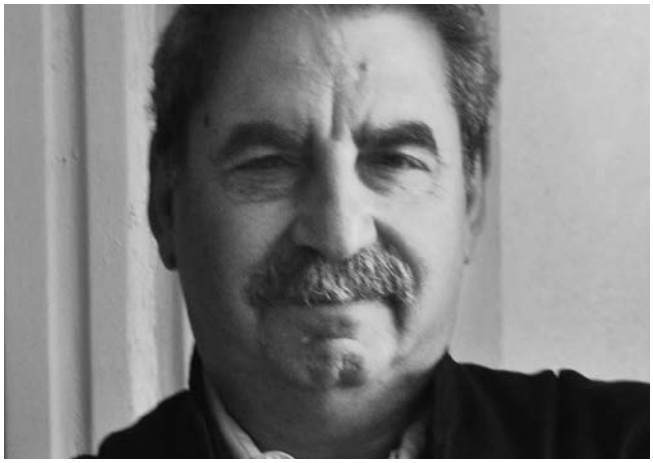
CERVEAU & BIEN-ÊTRE

Comment votre cerveau influence-t-il votre bien-être au quotidien ?

belin-editeur.com

Belin

FRANCIS WOLFF



« La beauté est dans les qualités sensibles, mais elle ne fait pas partie des qualités sensibles elles-mêmes »

Pour vous, philosophe, que représente la musique ?

Francis Wolff : Avant tout, c'est un phénomène anthropologique universel : partout où il y a des humains, il y a de musique. Ce constat est le point de départ de ma réflexion philosophique, entamée il y a dix ans sur la musique. Pourquoi tant de diversité et au fond d'universalité ?

Au XX^e^ siècle, plusieurs sciences sociales, relativistes, ont insisté sur l'extrême diversité des musiques du monde au point d'oublier l'universalité. En particulier, avec les ethnomusicologues, la notion même de musique s'est dissoute car elle accompagnait ici un rite, là une danse… Certains faisaient même remarquer que dans plusieurs langues, notamment africaines, le mot *musique* n'a pas d'équivalent.

À l'inverse, une nouvelle science née au tournant du XX^e^ et du XXI^e^ siècle, la biomusicologie, traque les universaux musicaux. Elle se fonde par exemple sur la psychologie évolutionniste et s'intéresse à la façon dont la musique a pu, ou non, procurer un avantage adaptatif à un certain moment de l'évolution humaine. Cette fois, on insiste sur l'universalité et on néglige un peu la diversité.

J'ai aussi cherché des universaux, mais en tant que philosophe, c'est-à-dire que je me suis demandé ce que la musique elle-même impliquait comme rapport au monde pour les humains. J'ai fait le parallèle avec deux autres modes d'expression universels chez les êtres humains, les images et les récits.

BIO EXPRESS

Philosophe, professeur émérite à l'École normale supérieure, à Paris, Francis Wolff a enseigné dans les universités de Reims, d'Aix en Provence, de Nanterre, de São Paulo…

Il a publié *Socrate, Aristote et la politique* et *Dire le monde*, aux PUF, ainsi que *D'Aristote aux neurosciences, Il n'y a pas d'amour parfait* et *Pourquoi la musique ?* chez Fayard.

Qu'est-ce qui les distingue ?

Francis Wolff : Produire des images consiste à représenter des choses visuelles, spatiales, en faisant abstraction du temps. On fige le temps, et on emprunte aux choses leurs qualités sensibles visuelles pour les figurer. Pour dessiner une fleur, on extrait du modèle sa forme,

ses couleurs, ses contours… pour les coucher sur une feuille de papier. On a alors une image. Cette façon de faire est strictement humaine.

Dans les récits, on s'intéresse essentiellement à la façon dont les êtres humains agissent. Ces actions sont réunies dans des mythes, des légendes, des romans… Ces faits et gestes, inscrits dans un passé parfois inventé, donnent leur identité aux êtres humains, et permettent aux individus, aux groupes ou aux sociétés de se définir.

Enfin, la musique, le troisième terme de mon triangle, est selon moi une manière de représenter non pas des événements, mais les relations entre des événements qui se suivent d'une certaine façon. Ce peut être par exemple un rythme régulier, et donc en partie prévisible, qui illustrerait des événements qui se succèdent.

C'est ainsi que j'ai abordé la musique, en y voyant la représentation d'un monde fait d'événements sans choses, de la même façon que les images sont des représentations d'un monde fait de choses sans événements. Avec la musique, on a l'impression de posséder les événements et de comprendre l'unité du temps qui les unit : c'est comme si on pouvait sortir de la caverne de Platon dans laquelle nous sommes peut-être prisonniers pour apercevoir les relations pures entre les événements sans choses.

Avec la musique, on est donc un peu plus détaché du réel qu'avec les images ou les récits ?

Francis Wolff : Oui tout à fait. La musique est un art plus abstrait parce qu'il n'y a ni image ni chose, à l'inverse d'un film, d'un roman, d'un tableau d'une sculpture… Et pourtant, la musique est l'art qui a le plus d'effets concrets. Rien de plus efficace que la musique pour envoyer des hommes à la mort, émouvoir les foules, mettre en transe, faire danser… Elle a un pouvoir incroyable.

J'ai supposé qu'il doit y avoir dans le rapport entre les événements sonores d'une musique quelque chose d'universellement efficace pour émouvoir, toucher les humains.

Je suis arrivé à la conclusion un peu paradoxale, contre-intuitive au premier abord, que la musique représente aussi quelque chose, mais pas *des* choses. Certes, on peut s'interroger : *La Mer*, de Debussy, ne rappelle-t-elle pas le mouvement des vagues ? Mais le cas est extrêmement anecdotique. Une fugue de Bach ou un solo de Charlie Parker ne représentent rien, en ce sens-là.

« Avec la musique, on sort de la caverne de Platon pour apercevoir les relations pures entre les événements sans choses »

On doit cesser de penser qu'une représentation est nécessairement iconique. Elle peut tout aussi bien nous renvoyer à la façon dont nous percevons la relation entre les événements du monde. La musique révèle comment les événements se succèdent idéalement dans le monde. En d'autres termes, avec la musique, nous entendons une relation de causalité imaginaire entre les sons successifs.

Pouvez-vous donner un exemple pour illustrer votre hypothèse ?

Francis Wolff : Imaginez-vous, fatigué et sur le point de vous endormir, dans un vieux train à l'arrêt. Brusquement, le train démarre : vous entendez alors le bruit des bogies contre les rails qui vous fait sursauter. Ce son a donc une valeur fonctionnelle. Cette dimension est importante pour les animaux que nous sommes, un son pouvant alerter sur une menace imminente. Ici, le son n'est pas lié directement à des choses, mais à un mouvement, à un événement au sens très large : le vent souffle, le chien s'approche…

Retournons dans le train. Le premier son vous informe que le train démarre, vous pouvez de nouveau vous assoupir. Puis la suite des sons eux-mêmes s'impose progressivement : « Ta Tac Ta Toum », « Ta Tac Ta Toum », « Ta Tac Ta Toum »… À chaque son, vous ne vous dites pas qu'il s'agit « des bogies contre les rails », « des bogies contre les rails », « des bogies contre les rails »…

Non, vous entendez un rythme, c'est-à-dire quelque chose de musical. Chaque son n'est plus perçu dans son rapport à sa cause « des bogies contre les rails », mais dans son rapport aux sons qui le précèdent ou qui le suivent. Le son « Toum » semble causé par le « Ta » qui le précède, lui-même causé par le « Tac »…

Vous entendez ainsi un pur processus sonore qui a une unité et où les causes sont désormais imaginaires. L'ensemble devient musical grâce à votre imagination qui établit une relation de causalité interne entre les sons.

Le rythme représente alors une relation de causalité idéale par laquelle les événements se succéderaient d'une façon absolument prévisible. Ce processus est extrêmement satisfaisant pour l'esprit et pour la raison, car il instaure de l'ordre. C'est confortable et rassurant.

La musique est souvent accompagnée de paroles. Comment l'expliquer ?

Francis Wolff : C'est une question importante, car l'immense majorité des musiques composées ou jouées est accompagnée de paroles. On peut remarquer qu'il existe une continuité entre la parole pure et la musique pure. J'ai établi un tableau d'une dizaine de cases (on aurait pu en faire plus) qui va de l'une à l'autre.

Les paroles pures sont uniquement fonctionnelles, telles que : « passe-moi le sel ». Avec la poésie, lyrique ou dramatique, on introduit un certain niveau de musicalité à l'intérieur de la parole. Le récit reste primordial, mais on donne de l'importance aux assonances, aux rimes, au rythme des sons… À mi-chemin se situent les airs d'opéra qui associent une unité proprement musicale et une unité proprement narrative. À l'autre bout du spectre, la musique strictement pure, uniquement instrumentale et non descriptive, fait figure d'exception.

Dans ce continuum entre paroles et musiques pures, on trouve une infinité d'intermédiaires, et ce sont eux qui, la plupart du temps, importent dans les cultures humaines.

Dans ce panorama, où placer le morceau *4'33"* de John Cage, qui n'est qu'un long silence ?

Francis Wolff : Ce morceau, qui est un peu une provocation, appartient à ce mouvement d'avant-garde qui, au XX^e^ siècle, a tenté de « déconstruire » la musique. Beaucoup d'artistes se sont interrogés, au deuxième degré, sur leur art en en retirant un à un tous les caractères qui le définissaient ordinairement. En peinture, on peut penser à Marcel Duchamp ou au cubisme qui ont interrogé les conditions de la représentation imagée.

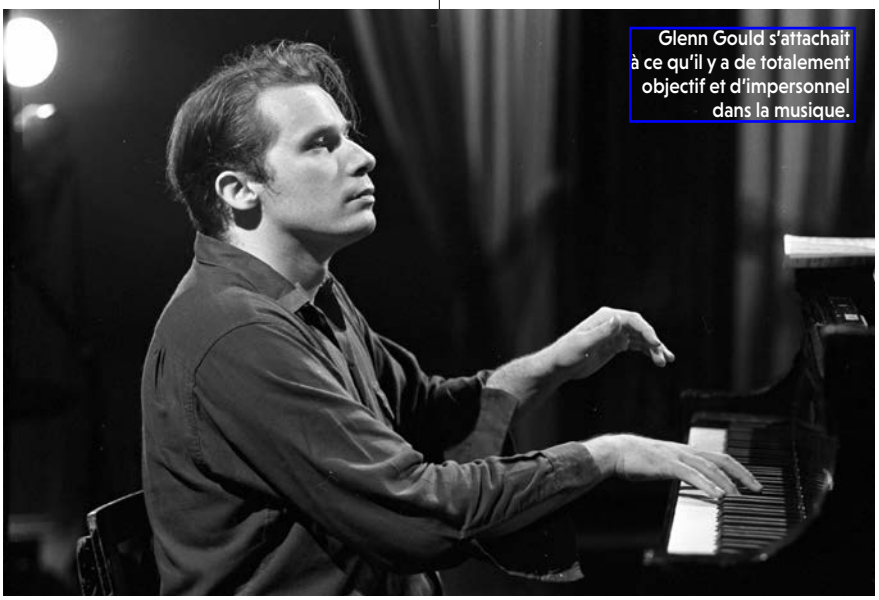
De même, on a défini la musique en retirant, parfois à titre expérimental, des caractères qu'on lui prêtait ordinairement (la mélodie, l'harmonie, le rythme…) ou en les combinant jusqu'au paradoxe de *4'33"* qui répond à la question : « Que se passe-t-il lorsqu'à l'art des sons (puisque c'est ainsi qu'on définit de façon extrêmement banale la musique) on retire le son ? »

Venons-en à la beauté en musique. Vous distinguez ce qu'en disent les discours savant et populaire ?

Francis Wolff : Le plus souvent, le discours savant évite le mot *beauté* qui lui semble relever de la subjectivité, de la relativité des cultures, des goûts personnels. Dans l'analyse d'une œuvre, un musicologue ne recourra que très rarement à cette notion de beauté, celle-ci semblant échapper à toute description, conceptualisation.

À l'inverse, l'idée de beauté est très banale dans le discours populaire. Nous nous sommes tous exclamés un jour : « tiens, c'est beau ! » Or le plus souvent, ce jugement trahit le fait que l'on ne sait pas quoi dire de plus excepté que ce que l'on entend nous plaît.

Dans les deux cas, la notion de beauté n'est pas conceptualisable, elle relève du jugement arbitraire et surtout de la relativité extrême des goûts individuels ou culturels.



Glenn Gould s'attachait à ce qu'il y a de totalement objectif et d'impersonnel dans la musique.

Cela conduit à la question du rôle du silence en musique ?

Francis Wolff : Il y a d'abord les silences internes à l'œuvre, par exemple ceux qui séparent deux mouvements. On peut distinguer un autre type de silence, plus interne à la musique. Une autre façon de définir la musique est d'y voir la transformation d'une succession d'événements sonores disjoints en un seul processus. Ces événements discrets sont nécessairement séparés par du silence. Mais la musicalité résulte du fait que vous entendez seulement la succession elle-même, les silences internes « disparaissant ».

Mais vous n'êtes pas d'accord avec cette idée…

Francis Wolff : Bien entendu, je ne nie pas que la beauté dépende d'une émotion ressentie subjectivement, mais elle a selon moi un fondement objectif.

Cependant, la beauté inscrite dans une musique ne peut être entendue que par quelqu'un dans une certaine disposition subjective : il faut être prêt. Cet aspect est parfois difficile à admettre. Je qualifie l'attitude en question d'esthétique. Elle se distingue de deux autres attitudes par rapport au monde sonore : l'attitude fonctionnelle (les sons m'avertissent) et l'attitude cognitive. Cette dernière est par exemple celle d'un ornithologue qui, dans une forêt, écoute les chants d'oiseaux pour les comprendre. Dans l'attitude esthétique, mon écoute n'est pas non plus fonctionnelle, mais je ne suis concerné que par les qualités sensibles elles-mêmes. Face à un tableau, l'attitude esthétique consiste à s'intéresser aux relations purement sensibles : le bleu s'associe bien avec le jaune, la composition est harmonieuse… Avec une musique, ce sera plutôt les timbres, les rythmes…

Dans tous les cas, l'attitude esthétique réduit ce que je vois ou ce que j'entends à ce qui retient mon attention, c'est-à-dire les qualités sensibles.

L'une d'elles correspond-elle à la beauté ?

Francis Wolff : Non. Une phrase du philosophe autrichien Ludwig Wittgenstein aide à comprendre ce que nous entendons par beauté : « Essayer d'imaginer un beau papillon exactement tel qu'il est, mais laid et non beau. » Impossible sans faire varier quelque chose de ses propriétés sensibles. Et pourtant, si l'on vous demande de décrire entièrement ce papillon, toutes ses qualités sensibles, vous le feriez sans faire mention de la « beauté ». Nous parvenons à un paradoxe : la beauté est dans les qualités sensibles, mais elle ne fait pas partie des qualités sensibles elles-mêmes. En d'autres termes, la beauté est une qualité des qualités.

Est-ce un type de propriété émergente ?

Francis Wolff : En quelque sorte, mais je préfère parler de qualités de second ordre, car pour les percevoir dans les qualités de premier ordre, on doit être dans une certaine relation par rapport à l'objet. En conséquence, l'émergence de la beauté n'est pas inéluctable. Pour qu'elle advienne, on doit justement être dans une attitude esthétique.

Que sont précisément ces qualités de second ordre ?

Francis Wolff : Ces qualités de second ordre uniquement perçues dans une attitude esthétique par rapport aux qualités de premier ordre sont des qualités d'ordre, des qualités rationnelles, par exemple le maximum d'effets pour un minimum de causes.

Prenons un exemple simple, la symétrie. Quand vous voyez un visage, vous percevez globalement plus de choses que

© Harold Whyte / GEtty Images

si vous aviez un œil en haut, un œil en bas, la moitié d'un nez ici, l'autre moitié par là.... Dans ce cas, plus d'efforts vous seraient nécessaires pour percevoir l'unité. Grâce à la symétrie, le cerveau et la vue font des économies : d'un seul coup d'œil, vous voyez plus de choses.

La symétrie n'est bien sûr pas synonyme de beau. Un visage parfaitement symétrique apparaît certes plus beau que celui de Quasimodo dont on a du mal à saisir l'unité. Mais par ailleurs, un visage légèrement asymétrique peut être plus beau qu'un visage complètement symétrique. Pour quelle raison ? Parce qu'un deuxième point de vue se superpose au premier. En l'absence de vraie dissymétrie, j'ai l'impression de percevoir plus de choses qu'avec un visage entièrement symétrique. C'est la même chose en musique, et cela explique qu'il n'y a pas de recette pour la beauté.

Comment néanmoins tenir compte de ces qualités de second ordre ?

Francis Wolff : Tout art qui vise la beauté, et notamment la musique, doit exploiter précisément ces qualités rationnelles. Elles sont peut-être plus difficiles à percevoir quand on n'a pas l'oreille habituée, et expliquent pourquoi des musiques sont moins accessibles que d'autres.

Pour un enfant, *Frère Jacques* peut être très beau, parce qu'il perçoit quelque chose qui se répète. Or la répétition est ici l'équivalent de la symétrie. Elle introduit une prévisibilité qui est rassurante pour l'esprit. Pour l'adulte, un mouvement dans lequel il perçoit une unité, mais aussi de la variété paraîtra beau.

La conclusion que l'on peut en tirer est que la beauté, en se bornant à un usage parcimonieux de ce concept (pas simplement pour signifier que cela plaît), est conceptualisable, même si elle respecte la subjectivité liée à l'indispensable attitude esthétique.

Jusqu'où l'interprétation intervient-elle dans la beauté d'une œuvre ?

Francis Wolff : D'abord, rappelons que la notion d'interprétation n'a de sens que pour la musique classique occidentale, parce que dans beaucoup de cultures, la musique n'est pas écrite. Et même si elle varie à chaque fois qu'elle est jouée, il n'y a pas ce rapport à l'interprétation fondé en Occident, depuis le XIVe siècle jusqu'à nos jours, sur l'écriture de la musique, sur une partition. La musique classique est composée d'abord puis jouée, et non pas improvisée par exemple en jazz dont une grande partie relève difficilement de l'interprétation : à partir d'un thème commun, chaque formation musicale fera entendre une musique différente. On parle alors plutôt de performance.

Dans la musique classique, l'interprétation peut néanmoins avoir un rôle essentiel, en particulier, avec les œuvres pour lesquelles la part expressive est importante. Cela concerne tout ce qui ne peut pas être strictement inscrit dans la partition et, par exemple, ne pourrait pas être joué par un ordinateur de façon automatique. C'est notamment le cas du rubato, une façon qu'a l'interprète de légèrement accélérer ou ralentir à certains moments pour donner un sentiment de respiration ou d'expression. Le rôle de l'interprète est alors de faire sentir cette expression, comme si la musique était le discours de quelqu'un qui parle. On évoque d'ailleurs son phrasé, sa manière de faire entendre une phrase dans une suite de sons.

Ces remarques sont surtout valables pour des musiques où la part de l'interprétation est importante. Dans d'autres cas, au contraire, l'interprète aura à cœur de gommer tout ce qui peut paraître expressif pour faire entendre la part la plus automatique ou mécanique de la musique. C'est ce que faisait très bien Glenn Gould en interprétant Bach : il essayait de faire ressortir ce qu'il y a dans cette musique de totalement objectif et d'impersonnel.

En cherchant à expliquer la beauté, ne la réduit-on pas ?

Francis Wolff : Je ne le crois pas, pour deux raisons. D'abord parce que je ne pense pas qu'expliquer un poème nuise à l'émotion que l'on peut ressentir à sa lecture. Bien au contraire, la compréhension de toutes les nuances d'un poème augmente la profondeur des sentiments et des émotions que l'on éprouve. Il en va de même pour une musique. Un morceau que l'on entend pour la première fois peut nous émouvoir. Mais lorsqu'on l'écoute plusieurs fois, quand on pénètre la partition, que l'on saisit mille nuances, je pense que les émotions sont plus fortes.

« La beauté suppose l'équilibre, la mesure, alors que le sublime renvoie à l'excès, à la force non maîtrisable »

Le plaisir lié à la musique n'est pas uniquement lié à la beauté.

Francis Wolff : La beauté est importante, mais ce n'est pas toute la musique ! Certains morceaux peuvent être bouleversants sans être particulièrement beaux au sens strict. Parfois quand les mots nous manquent, on s'exclame « c'est beau », ou lorsqu'on veut dire « c'est très beau », on s'écrie « c'est sublime ».

Toutefois, *sublime* n'est pas synonyme de *très beau*. Dans la théorie classique de l'esthétique, *sublime* s'oppose à *beau*. La beauté suppose l'équilibre, la mesure alors que le sublime renvoie à l'excès, à quelque chose que nous n'arrivons pas à maîtriser tellement il y a de force. Par exemple, pour certains la musique de Richard Wagner est sublime. C'est tout le contraire de beau, car on est écrasé par une force qui nous submerge. On éprouve un sentiment de démesure.

Qu'en est-il d'une musique « jolie » ?

Francis Wolff : Lorsqu'on parle avec précision, la joliesse s'oppose également à la beauté. On n'imagine pas dire d'une toile de Vélasquez, par exemple *Les Ménines*, qu'elle est jolie, mignonne. Le mot *joli* renvoie à quelque chose de beau, mais aussi de petit. La joliesse est donc une émotion esthétique particulière, que l'on peut éprouver notamment face à certaines aquarelles. De même, en musique, je parlerais de beauté pour une symphonie de Mozart, et réserverais l'idée de joliesse pour une petite ritournelle. En fin de compte, la beauté est un concept assez restreint. ■

Propos recueillis par Loïc Mangin

L'ESSENTIEL

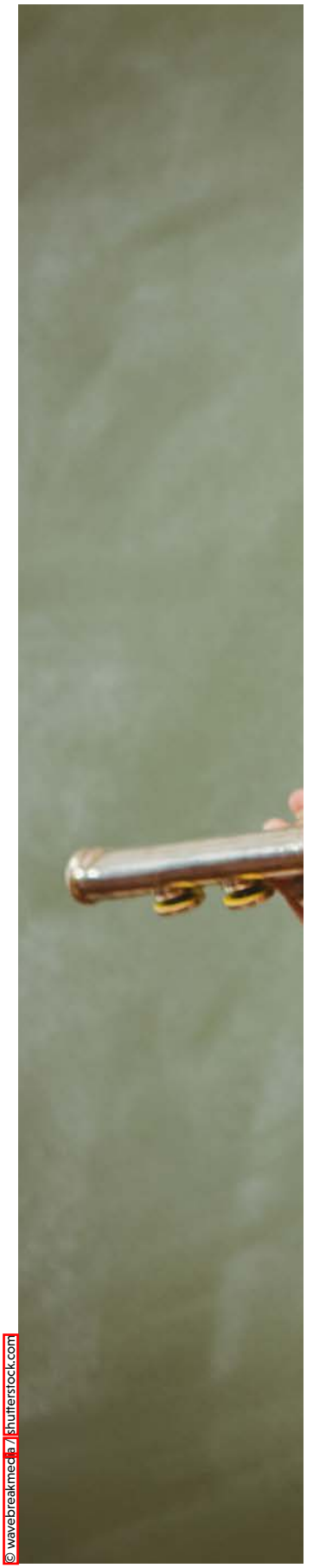
- Pratiquée en groupe, la musique développe des comportements altruistes et coopératifs.
- En moyenne, les enfants et les adolescents musiciens ont alors de meilleurs résultats à l'école.
- Elle stimule aussi de nombreuses capacités cognitives, comme le raisonnement abstrait, la concentration et l'intelligence verbale.

L'AUTEUR

NICOLAS GUÉGUEN
directeur du Laboratoire d'ergonomie des systèmes, traitement de l'information et comportement (Lestic) à Vannes.

Oui, la musique rend intelligent

L'apprentissage de la musique demande des efforts, mais entraîne une pluie de retombées positives sur la concentration, l'intelligence, la sociabilisation… et ce dès la maternelle !



© wavebreakmedia / shutterstock.com

Le 8 juin 2017, le ministre de l'Éducation nationale Jean-Michel Blanquer exposait ses pistes pour réformer l'école dans une interview au journal *Le Parisien*. Parmi celles-ci: développer l'enseignement de la musique. «Je compte notamment faire en sorte qu'il y ait des chorales dans toutes les écoles et collèges», annonçait ainsi le ministre. «Nous allons aussi encourager les pratiques instrumentales et les concerts.»

Que penser de cette annonce? Les écoliers doivent déjà apprendre la lecture, l'écriture, le calcul, la géographie, l'histoire… La pratique musicale mérite-t-elle une place de choix dans leurs agendas surchargés?

DES BIENFAITS DÈS LA MATERNELLE

Oui, à en croire les recherches en psychologie. Dès le plus jeune âge, l'exigence et la rigueur nécessaires à l'apprentissage d'un instrument semblent déteindre sur de multiples capacités cognitives et traits de caractère. Quand elle est pratiquée en groupe, la musique aide en outre à aller vers les autres.

Deux psychologues, Sebastian Kirschner et Michael Tomasello, de l'institut Max-Planck, en Allemagne, ont ainsi montré que les jeux musicaux stimulent la sociabilité et l'entraide >

dès la maternelle. Dans leur expérience, des paires d'enfants d'environ 4 ans et demi étaient placés face à des fausses grenouilles prétendument endormies, qu'ils avaient pour mission de réveiller. La moitié des binômes étaient armés de petits instruments de percussion, avec lesquels ils devaient jouer en rythme sur une chanson et un accompagnement de guitare, tandis que l'autre moitié n'avaient que leur voix à disposition. Après cette tâche, les deux enfants de chaque duo devaient retourner en même temps un tube transparent contenant des boules de couleur. L'astuce a consisté à mal fermer l'un des deux tubes, afin que les boules tombent et que l'on puisse tester si les enfants s'entraidaient pour les ramasser. Et ce fut bien le cas, mais pas pour tous! Alors que 54% des enfants ayant effectué le jeu musical s'assistaient mutuellement, seuls 17% des membres de l'autre groupe se montraient solidaires.

PLUS D'ENTRAIDE ET DE COOPÉRATION

Dans la suite de l'expérience, les chercheurs ont introduit une tâche qu'il était possible de résoudre seul ou, de manière plus efficace, en coopérant. Or les petits musiciens en herbe ont davantage opté pour ce dernier type de stratégie. Comment expliquer cette progression des comportements d'entraide et de coopération? Chanter et jouer de la musique ensemble implique de regarder autrui, de se coordonner et de se représenter une intention collective. Au point d'affermir le sentiment d'appartenir à une même communauté.

Outre ces bénéfices sur la sociabilisation, la pratique musicale renforce nombre de capacités cognitives. Elle aide notamment les jeunes enfants à acquérir les briques élémentaires du raisonnement abstrait, comme l'ont montré Terry Bilhartz et ses collègues de l'université d'État Sam-Houston, à Huntsville, au Texas. Dans leur expérience, un groupe d'enfants de 4 à 5 ans suivait une formation musicale pendant neuf mois, à raison d'une séance par semaine. Le programme était bien sûr adapté à leur âge: chant, exercices vocaux, percussions, lecture et écriture de notes sur une partition, gestes du bras suivant un rythme précis... Ils devaient en outre travailler ces exercices et écouter des CD de musique à la maison.

Avant et après ce programme, les enfants ont subi une batterie de tests cognitifs, extraits de l'échelle d'intelligence de Stanford-Binet. Résultat: par rapport au groupe contrôle, ils ont davantage développé leur capacité de mémoriser et manipuler des images mentales, une des bases du raisonnement abstrait. Rien d'étonnant, car la pratique musicale mobilise en permanence les facultés d'abstraction. Les enfants doivent ainsi jongler avec des symboles comme des ronds sur une portée, qui modélisent une hauteur de son et un rythme mélodique.

Sylvain Moreno, de l'institut de recherche Rotman, à Toronto, au Canada, et ses collègues se sont quant à eux intéressés aux effets de la musique sur le langage. L'hypothèse était là aussi que ces deux domaines mobilisent certaines compétences identiques, comme la capacité à manipuler des symboles, et mettent donc en jeu des aires cérébrales communes; en outre, l'entraînement musical stimulerait l'attention et la mémoire, des capacités précieuses pour retenir de nouveaux mots au jour le jour.

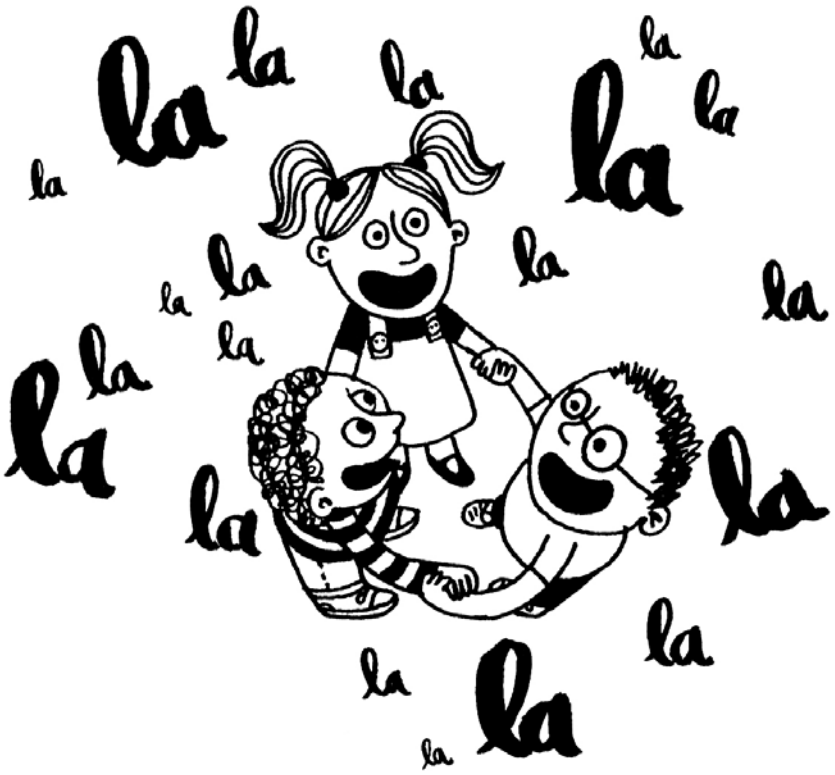
Les chercheurs ont élaboré un programme relativement court, comportant une vingtaine d'heures de musique réparties sur quatre semaines. Des exercices de rythme, de mélodie et de tonalité alternaient avec une initiation aux concepts musicaux de base. Des enfants de 4 à 6 ans ont suivi ces leçons, délivrées par des personnages de dessins animés dans des films projetés sur le mur de la classe.

Les résultats ont été spectaculaires: 90% des enfants ont amélioré leur intelligence verbale, mesurée par un test de vocabulaire (les enfants devaient expliquer le sens de 25 mots différents); le score obtenu à ce test a progressé de 20% en moyenne. Un mois de cours de musique suffit donc à obtenir des bénéfices cognitifs!

Reste que ceux-ci sont d'autant plus grands que la pratique est longue, comme le montrent les travaux de Kathleen Corrigall et Laurel Trainor, de l'université McMaster, au Canada. Ces chercheurs ont administré une série de tests à un groupe d'enfants de 6 à 9 ans, ayant eu plus ou moins de contacts avec la musique: certains étaient presque totalement néophytes, tandis que d'autres, qui avaient commencé à l'âge des couches-culottes, jouaient d'un

L'amélioration de l'attention est la clé des bénéfices que procure la musique

Source: S. Kirschner et M. Tomasello, J. Exp. Child Psychol., vol. 103, pp. 354-364, 2010; Evolution and Human Behavior, vol. 31, pp. 354-364, 2010; Journal of Experimental Child Psychology, vol. 116, pp. 354-369, 2013; Music Perception, vol. 30, pp. 519-534, 2013; Frontiers in Psychology, vol. 5, pp. 1-10, 2014; Developmental Science, vol. 17, pp. 1-14, 2014; Psychological Science, vol. 25, pp. 1989-1998, 2014; Frontiers in Psychology, vol. 6, pp. 1-10, 2015; Journal of Experimental Child Psychology, vol. 140, pp. 162-173, 2015; Frontiers in Psychology, vol. 7, pp. 1-10, 2016; Journal of Experimental Child Psychology, vol. 142, pp. 228-240, 2016; Journal of Experimental Child Psychology, vol. 166, pp. 414-426, 2018



Cinquante-quatre pour cent des enfants qui ont effectué un jeu musical ensemble s'assistent mutuellement quand l'un d'eux est confronté à une difficulté par la suite, contre 17 % de ceux qui n'ont pas pratiqué le jeu.

instrument depuis plus de 6 ans ! Or plus ils avaient pratiqué longtemps, plus ils étaient forts en lecture, en particulier en compréhension de texte. Sans doute parce que la musique exerce diverses compétences nécessaires à la lecture : parcourir des notations écrites de gauche à droite (les enfants de cette étude utilisaient le système d'écriture occidental et lisaient donc dans ce sens), décoder des symboles, les lier à des sons… Et surtout, là encore, les enfants s'habituaient à s'autodiscipliner et à se concentrer pendant un certain temps. L'amélioration des capacités d'attention semble donc une clé de voûte des bénéfices variés que procure la musique.

DE MEILLEURES NOTES À L'ÉCOLE

Plus généralement, celle-ci améliore les « fonctions exécutives », qui incluent l'attention, mais aussi la planification et l'inhibition (la capacité de lutter contre certains réflexes pour enclencher le raisonnement). C'est ce que vient de confirmer une vaste étude, publiée par Artur Jaschke et ses collègues de l'université d'Amsterdam. Elle porte sur près de 150 enfants âgés d'un peu plus de 6 ans au départ, et qui ont suivi des cours de musique pendant deux ans et demi. Les évaluations ont révélé que par rapport aux membres du groupe contrôle, leurs fonctions exécutives ont davantage progressé lors de cette période. Un impact qui se voit jusque dans le cerveau : grâce à une étude par IRMf, l'équipe de la psychologue américaine Nadine Gaab a montré que les zones cérébrales associées aux fonctions exécutives, comme le cortex préfrontal médian, s'activent davantage chez les enfants musiciens que chez les non-musiciens lors de tests cognitifs mobilisant ces fonctions.

Et ces bénéfices se traduisent dans les résultats scolaires ! Arnaud Cabanac, de l'École de Rochebelle, au Québec, et ses collègues ont montré que des adolescents de 17 ans qui ont choisi l'option musique quelques années plus tôt ont en moyenne de meilleures notes que les autres dans des matières aussi variées que les mathématiques, l'histoire et les sciences économiques et sociales. Pour les chercheurs, de tels résultats plaident largement en faveur de l'éducation musicale à l'école.

D'autres travaux vont aussi dans le sens d'un sérieux coup de pouce aux performances académiques, comme ceux d'Adrian Hille et Jürgen Schupp, de l'université Freie, à Berlin : les adolescents suivis par ces chercheurs, âgés de 17 ans, réussissaient mieux à l'école lorsqu'ils pratiquaient un instrument de musique depuis l'enfance. Ces chercheurs ont aussi montré des différences de personnalité : les adolescents musiciens se sont révélés plus consciencieux, plus ouverts d'esprit et plus ambitieux.

Bien sûr, ces deux dernières études se fondent sur des corrélations et la causalité va probablement aussi dans l'autre sens : un enfant consciencieux et capable de se concentrer longtemps dès le départ aura tendance à poursuivre plus longtemps la musique et à mieux réussir à l'école. Mais la rigueur, la patience et la modestie que réclame la musique renforcent probablement ces traits, comme le suggèrent les résultats obtenus avec des programmes d'entraînement sur de jeunes enfants. À tout le moins, un cercle vertueux se met en place. Avis aux recruteurs, la pépite qu'ils recherchent est peut-être un(e) musicien(ne).

Quant aux adolescents, la musique pourrait aussi les aider à surmonter une épreuve souvent difficile à cet âge : trouver l'âme sœur. De nombreux travaux montrent en effet que les musiciens (mais pas les musiciennes) exercent un attrait irrésistible sur le sexe opposé. Le fameux beau gosse guitariste, cela vous dit quelque chose ? Ainsi, dans une expérience menée par Sigal Tifferet, du centre académique Ruppin, en Israël, et ses collègues, un jeune homme postait une photo de lui sur son profil Facebook, tantôt avec une guitare et tantôt sans, puis demandait des jeunes filles inconnues comme amies. Sans la guitare, elles n'ont été que 10 % à accepter, contre 28 % avec. Soit près de trois fois plus ! Voilà qui en motivera sans doute certains pour les longues et fastidieuses séances de solfège… ■

BIBLIOGRAPHIE

A. JILLE ET J. SCHUPP, How learning a musical instrument affects the development of skills, *Economics of Education Review,* vol. 44, pp. 56-82, 2014.

S. TIFFERET *ET AL.*, Guitar increases male Facebook attractiveness, *Letters on Evolutionary Behavioral Science,* vol. 3, pp. 4-6, 2012.

S. MORENO *ET AL.*, Short-term music training enhances verbal intelligence and executive function, *Psychological Science,* vol. 22, pp. 1425-1433, 2011.

© Charlotte-Martin/www.c-est-a-dire.fr

À LIRE EN PLUS

Les Bienfaits de la musique sur le cerveau
EMMANUEL BIGAND

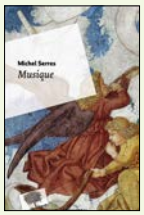
BELIN ÉDITEUR, 2018
(**208 PAGES, 18 EUROS**)

La science est aujourd'hui capable de comprendre l'effet de la musique sur le cerveau. De fait, on peut suivre le parcours du son, de l'oreille jusqu'au cerveau, et de voir grâce à l'IRM, les effets que les sons produisent. On se rend compte que la musique modifie les mécanismes biochimiques du cerveau: elle active, par exemple, la production de dopamine, un neurotransmetteur essentiel au fonctionnement du cerveau car il contribue à sa plasticité, et... qui nous fait vibrer. Dans cet ouvrage, on découvre que la musique fait bien plus qu'adoucir les mœurs!

Pourquoi la musique ?
FRANCIS WOLFF

FAYARD, 2015
(**464 PAGES, 22 EUROS**)

La musique est l'art des sons. De cette définition banale, l'auteur, philosophe et professeur à l'École normale supérieure, tire toutes les conséquences jusqu'aux plus éloignées. Chemin faisant, il répond aux questions que nous nous posons sur la musique et sur les arts. Pourquoi, partout où il y a de l'humanité, y a-t-il de la musique? Pourquoi la musique nous fait-elle danser? Et pourquoi nous émeut-elle parfois? Qu'exprime la musique pure? Représente-t-elle quelque chose? Et qu'est-ce que la beauté? Est-elle dans les choses ou en nous? Les questions les plus simples sont souvent les plus profondes.



Musique
MICHEL SERRES

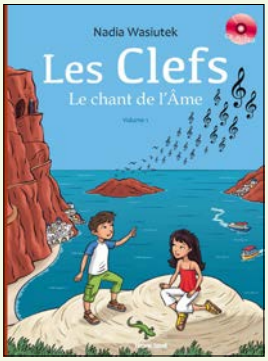
LE POMMIER, 2014
(**144 PAGES, 8 EUROS**)

D'où jaillit la musique? Des bruits du monde? Des clameurs issues des assemblées? De nos émotions? Et comment la définir? Rien de plus difficile que de répondre à ces questions. Pour ce faire, l'auteur a préféré dire ce qu'est la musique en trois contes. Le premier suit la vie d'Orphée jusqu'à sa plongée dans les Enfers à la recherche d'Eurydice, son amante. Le second, autobiographique, envahit le Grand Récit de la connaissance, qui devient ici une Grande Symphonie. Biblique enfin, le dernier psalmodie, de la Genèse à la Nativité. Au final, un livre sur la musique écrit avec musique!

Parole et musique
Aux origines du dialogue humain
STANISLAS DEHAENE ET CHRISTINE PETIT

ODILE JACOB, 2009
(**368 PAGES, 31,90 EUROS**)

Parole et musique façonnent notre vie sociale et notre relation au monde. Mais d'où provient l'aptitude singulière de notre espèce à donner du sens à l'expression de signaux acoustiques? Existe-t-il des parentés entre les sonorités émises et traitées par l'un et l'autre système? Peut-on parler de langage musical? Ou bien doit-on affirmer avec Wagner que la musique commence là où s'arrête le pouvoir des mots? Un colloque qui s'est tenu au Collège de France a tenté de répondre à ces questions.



JEUNESSE

Les Clefs
NADIA WASIUTEK

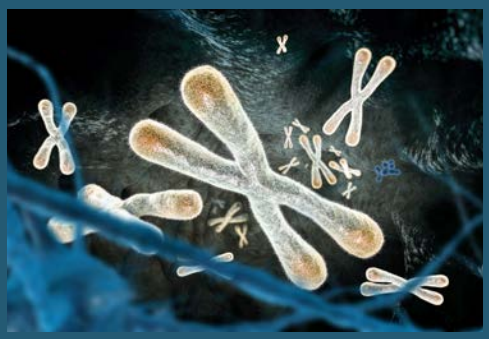
PAPIERS MUSIQUE, 2018
(**56 PAGES, 17 EUROS**)

Grâce à un conte un peu magique et fantastique en trois volumes, on découvre, pas à pas, l'univers du solfège, on apprend, de manière ludique à déchiffrer une partition. Chaque opus est accompagné d'un CD audio sur lequel l'histoire est racontée, les exercices, lus et chantés. Compositrice et chef d'orchestre, l'auteure a voulu désacraliser le solfège en rendant son apprentissage captivant, car trop de personnes ont abandonné la musique à cause d'une approche trop austère! Elles sont passées à côté « d'une pratique aussi indispensable que l'air que l'on respire », et d'une richesse insoupçonnée.

RENDEZ-VOUS

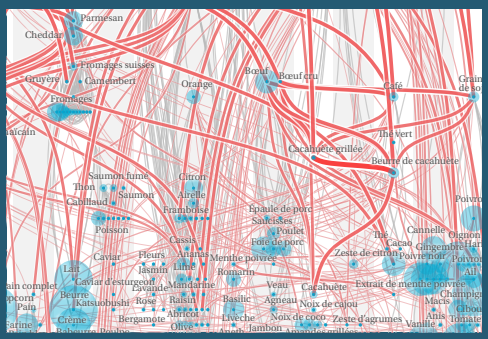
P. 110

REBONDISSEMENTS
DES ACTUALITÉS SUR
DES SUJETS ABORDÉS
DANS LES HORS-SÉRIES PRÉCÉDENTS



P. 114

DONNÉES À VOIR
DES INFORMATIONS
SE COMPRENNENT MIEUX
LORSQU'ELLES SONT MISES EN IMAGES



P. 116

LES INCONTOURNABLES
DES LIVRES, DES EXPOSITIONS,
DES SITES INTERNET, DES VIDÉOS,
DES PODCASTS… À NE PAS MANQUER

P. 118

SPÉCIMEN
UN ANIMAL ÉTONNANT CHOISI
PARMI CEUX PRÉSENTÉS SUR
LE BLOG « BEST OF BESTIOLES »

P. 120

ART & SCIENCE
COMMENT UN ŒIL SCIENTIFIQUE
OFFRE UN ÉCLAIRAGE INÉDIT
SUR UNE ŒUVRE D'ART

Hors-Série 99 : Cancer

L'immortalité n'est pas éternelle

L'identification de deux enzymes impliquées dans la protection des chromosomes à chaque division cellulaire offre une piste inédite pour briser l'immortalité des cellules cancéreuses.

Le *Hors-Série* n° 99 : **«Cancer. L'arsenal des nouvelles thérapies» listait l'ensemble des propriétés des cellules tumorales.** L'une d'elles est l'immortalité, et elle pourrait bien vaciller grâce à la découverte de Joachim Lingner et Wareed Ahmed, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, en Suisse. La clé de cette immortalité réside dans les télomères. De quoi s'agit-il ?

À chacune de ses extrémités, les chromosomes sont dotés de longues séquences d'ADN répétitives : les télomères. À chaque division cellulaire, ils raccourcissent jusqu'à disparaître. L'inflammation et le stress oxydatif (l'agression des constituants de la cellule par des composés réactifs oxygénés) favorisent aussi cet effet. En fin de compte, les chromosomes deviennent vulnérables, ce qui entraîne la sénescence des cellules. Ainsi, les télomères constituent une sorte de compte à rebours de la cellule. Des télomères courts sont associés à des risques de maladies cardiovasculaires, au vieillissement…

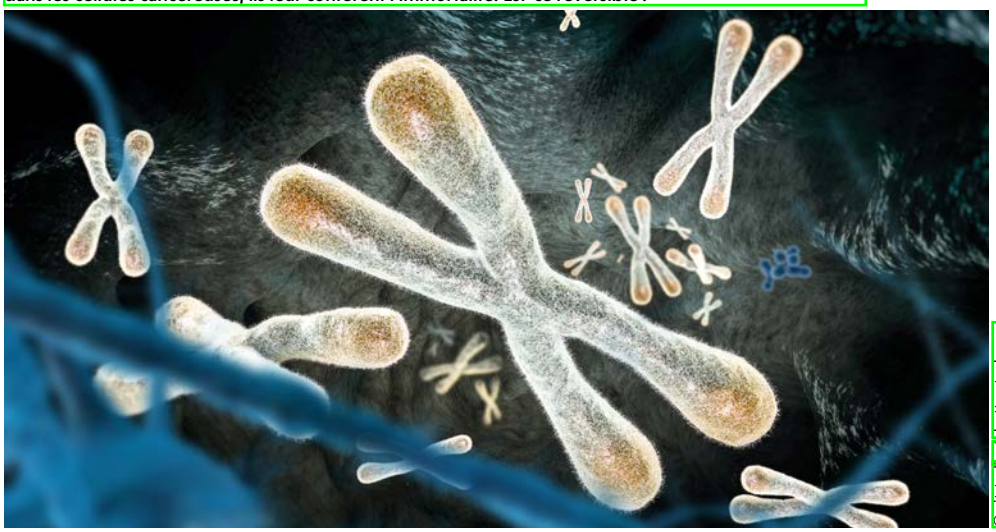
Toutefois, ce phénomène n'est pas inéluctable. De fait, il est contré par une enzyme, la télomérase, qui naturellement allonge les télomères. Mais la télomérase n'est active que dans les cellules souches, les cellules germinales, les follicules pileux, et dans 90 % des cellules tumorales.

Les biologistes ont identifié deux enzymes, la peroxirédoxine 1 (PRDX1) et la 7,8-dihydro-8-oxoguanine triphosphatase (MTH1), qui ensemble protègent les télomères des ravages du stress oxydatif. Pourraient-elles aider à lutter contre l'immortalité des cellules tumorales ? C'est bien le cas, l'inhibition de ces deux enzymes dans des cellules cancéreuses déclenche le raccourcissement des télomères et même leur disparition. Les cellules redeviennent mortelles, car la cible de la télomérase, dépourvue de la protection de PRDX1 et de MTH1, est endommagée par les composés réactifs oxygénés.

Ainsi, plutôt que de viser la télomérase, une piste très étudiée aujourd'hui en cancérologie, mais aux résultats encore décevants, le blocage de PRDX1 et de MTH1 ciblerait son substrat, c'est-à-dire l'extrémité du chromosome, pour qu'elle ne puisse pas l'allonger. L'immortalité des cellules cancéreuses est peut-être sur le point de… mourir. ■

W. AHMED ET J. LINGNER, *GENES & DEVELOPMENT*, PRÉPUBLICATION EN LIGNE, 2018

Aux extrémités des chromosomes, les télomères influent sur la longévité des cellules. Sans cesse réparés dans les cellules cancéreuses, ils leur confèrent l'immortalité. Est-ce réversible ?



© vitstudio / shutterstock.com

De la petite monnaie

Au IVe siècle avant notre ère, le Macédonien Alexandre le Grand s'est rendu maître de l'Empire perse des Achéménides. Le *Hors-Série* n° 96 : «Alexandre le Grand. Quand l'archéologie bouscule le mythe» rendait compte de cette épopée. Près du mont du Temple, à Jérusalem, des archéologues ont récemment mis au jour trois pièces juives datant de cette époque. Très petites, (7 millimètres de diamètre), en argent, elles sont frappées d'un hibou et de l'inscription, en hébreu ancien, «*yhd*». Ces lettres renvoient à Yehoud, le nom d'une province semi-autonome de l'Empire perse. Elle perdit son indépendance à l'arrivée d'Alexandre le Grand.

HTTP://BIT.LY/ALG-YHD

Le spectre du réseau de neurones

Les réseaux de neurones sont au cœur de l'apprentissage profond, clé de voûte de l'intelligence artificielle décrite dans le *Hors-Série* n° 98 : «Big Data. Vers une révolution de l'intelligence ?». John Peurifoy, de l'institut de technologie du Massachusetts, aux États-Unis, et ses collègues proposent d'en utiliser un pour modéliser le spectre de diffusion de la lumière par des nanoparticules de diverses tailles (un phénomène qui obéit aux lois de Maxwell). Selon leurs calculs, peu de données seraient nécessaires pour obtenir une bonne approximation, meilleure que celle obtenue par des simulations conventionnelles. De plus, le réseau pourrait fonctionner «à l'envers» : quand on lui fournit un spectre de diffusion quelconque, il renseigne sur la meilleure géométrie des nanoparticules pouvant conduire à ce résultat.

J. PEURIFOY *ET AL.*, *SCIENCE ADVANCES*, VOL. 4(6), EAAR4206, 2018

Hors-Série 97 : Big Bang

La matière noire a refroidi l'ambiance

L'Univers, dont le *Hors-Série* n° 97 : « **Et si le Big Bang n'avait pas existé ?** » racontait les débuts, recèle encore bien des mystères. Ainsi en est-il de la matière noire, une hypothétique substance dont seul l'effet gravitationnel se fait sentir sur la matière ordinaire, dite baryonique. C'est important, car la première est cinq fois plus abondante que la seconde ! De nombreuses expériences traquent cette matière noire, mais sans succès. On ne fait que contraindre les propriétés dont elle serait dotée. Récemment, Julian Muñoz et Abraham Loeb, de l'université Harvard, aux États-Unis, ont proposé qu'elle puisse être très légèrement chargée électriquement. Comment en sont-ils arrivés à cette hypothèse ?

Ils ont exploité un résultat récent de l'expérience *Edges* (installée à l'observatoire Murchison, en Australie) dédié à l'étude de l'hydrogène : ce gaz et l'ensemble de l'Univers étaient, 180 000 millions d'années après le Big Bang, beaucoup plus froid qu'attendu. C'est à cette époque, dite de réionisation, que les premières étoiles ont commencé à briller. Les astrophysiciens expliquent cet écart par une interaction de la matière ordinaire avec une petite quantité de matière noire très peu chargée.

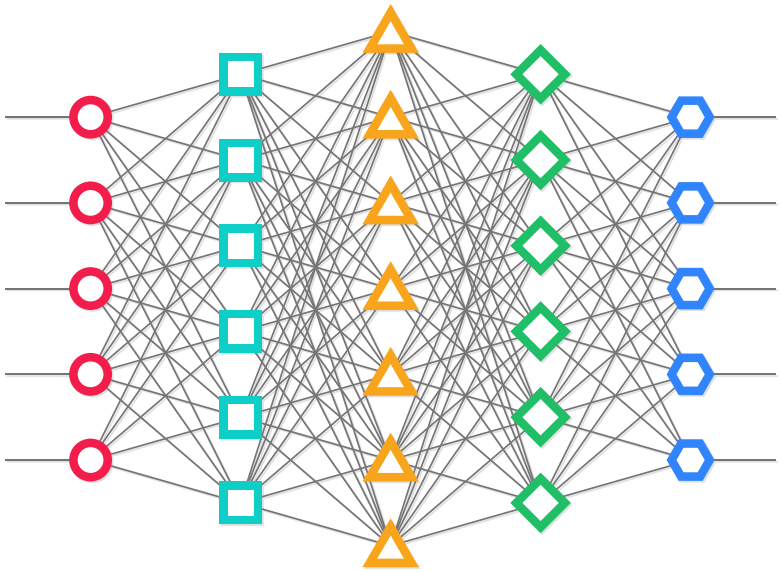
Plus précisément, les résultats d'*Edges* s'expliquent quand on suppose que moins de 1 % de la matière noire portait une charge 1 million de fois inférieure à celle de l'électron. L'idée d'une matière noire chargée n'est pas récente : elle a déjà été formulée au début des années 1990, notamment par Sheldon Glashow, Prix Nobel de physique en 1979. Cette fois, elle vient en soutien d'une observation. Cependant, celle-ci reste encore à affiner. En fin de compte, le « portrait-robot » de la matière noire reste encore flou. ■

J. MUÑOZ ET A. LOEB, *NATURE*, VOL. 557, PP. 684-686, 2018

Hors-Série 98 : Big Data

Plus fort qu'un dermatologue

Une intelligence artificielle entraînée par apprentissage profond détecte plus efficacement les mélanomes que des dermatologues aguerris.



Un réseau de neurones nourri au Big Data surpasse parfois en expertise les meilleurs spécialistes.

Les prouesses du *deep learning* (l'apprentissage profond) étaient détaillées dans le *Hors-Série* n° 98 : « **Big Data. Vers une révolution de l'intelligence ?** ». La technique consiste à entraîner une machine, un réseau de neurones artificiels dont l'architecture est inspirée de celle du cerveau humain, avec un nombre considérable de données (du *big data*) pour qu'elle développe une expertise dans un domaine précis. C'est ainsi qu'un programme peut devenir imbattable au jeu de go, vous répondre lorsque vous interrogez votre smartphone, classifier des galaxies, reconnaître des visages… Holger Hänssle, de l'université de Heidelberg, en Allemagne, a ajouté une nouvelle corde à l'arc de l'intelligence artificielle : le diagnostic des mélanomes, l'un des plus fréquents cancers de la peau.

D'ordinaire, ces lésions sont repérées et identifiées par des dermatologues dont l'œil a été exercé pendant de longues années. Cette fois, un algorithme, Inception V4 de Google, a été « nourri » avec plus de 100 000 images annotées de lésions de la peau et de grains de beauté. Son efficacité a ensuite été comparée à celle de 58 dermatologues internationaux. Résultat ? Sur 100 cas jugés difficiles à diagnostiquer (avec la seule vue), la machine à fait mieux que l'humain : 95 % contre 89 %. Qui plus est, Holger Hänssle précise que l'algorithme a « fait moins d'erreurs de diagnostic consistant à voir des mélanomes dans des grains de beauté bénins ». En d'autres termes, il y a moins de faux positifs, et donc moins de traitements inutiles.

Toutefois, l'intelligence artificielle est encore loin de remplacer complètement les médecins. Elle est d'ores et déjà un outil voire un allié précieux pour poser un bon diagnostic, surtout lorsqu'il s'agit de détection précoce. ■

H. HANSSLE, ANNALS OF ONCOLOGY, PRÉPUBLICATION EN LIGNE, 2018

© a_l_s_mad4 / shutterstock.com

Hors-Série 96 : Alexandre le Grand

L'oiseau et l'enfant… momifiés

Une momie que l'on croyait être celle d'un faucon est en fait celle d'un enfant, mort-né et souffrant de nombreuses anomalies du développement. Pourquoi l'a-t-on ainsi préservé ?

À la mort du héros du *Hors-Série* n° 96: «Alexandre le Grand. Quand l'archéologie bouscule le mythe», en 332 avant notre ère, ses généraux se partagèrent son empire et fondèrent, avec plus ou moins de succès, des dynasties. La plus célèbre est celle des Lagides, fondée par Ptolémée, qui régnèrent près de trois siècles sur l'Égypte jusqu'à la défaite de Cléopâtre. L'époque dite Ptolémaïque a été globalement une période de prospérité culturelle qui a laissé de nombreux trésors, et notamment des momies. Andrew Nelson, de la Western University, en Ontario, au Canada, et ses collègues, viennent de faire une étonnante découverte au sujet de l'une d'elles.

Tout commence au musée de Maidstone, dans le Kent, en Grande-Bretagne. L'établissement s'enorgueillit d'une riche collection dédiée à l'Égypte antique et de plusieurs momies. L'une, datée de 2100 ans, est inventoriée ainsi: «EA 493, faucon momifié, époque ptolémaïque.» Un faucon, vraiment? Les premières révélations quant à une erreur d'identification sont apparues en 2016 lors d'un examen par tomodensitométrie, effectué en marge de l'étude de la star du musée, la momie d'une femme vieille de 2 700 ans. EA 493 n'est pas la momie d'un oiseau, mais celle d'un fœtus. Cependant, les images obtenues manquaient de détail.

Pour en savoir plus, Andrew Nelson, à la tête d'une équipe internationale, a décidé d'utiliser une technique plus fine, la microtomodensitométrie. Il a présenté ses résultats à l'occasion du Congrès international d'études sur les momies, qui s'est tenu fin mai 2018, à Tenerife, dans l'archipel des Canaries.

L'individu momifié est un garçon, mort-né entre 23 et 28 semaines de grossesse. Il souffrait de graves malformations: son cerveau, son crâne et ses vertèbres ne s'étaient pas développés normalement (on parle d'anencéphalie). Cette anomalie résulte d'une fermeture incomplète du tube neural lors de l'embryogenèse. En conséquence, toute la partie supérieure de la tête, au-dessus des yeux, est comme coupée, ce qui expliquerait la confusion avec un oiseau.

L'anencéphalie traduit souvent une carence maternelle en acide folique (la vitamine B_9), un composé que l'on trouve notamment dans les fruits secs (noisette, noix, amande…) et les légumes verts (épinards, salade, oseille…). Doit-on en conclure à une famine à l'époque de la grossesse? On peut aussi s'interroger, avec Andrew Nelson, sur la motivation d'une telle momification. Attribuait-on des vertus, des pouvoirs à ce fœtus? Voyait-on en lui une image d'Horus, le dieu à tête de… faucon? ■

LE COMMUNIQUÉ DE LA WESTERN UNIVERSITY : HTTP://BIT.LY/UWO-MUM

La momie EA 493 du musée de Maidstone, en Grande-Bretagne, a révélé ses secrets. Ce n'est pas un faucon, mais un enfant.

Maidstone Museum UK/Nikon Metrology UK

Se passer des chimiothérapies ?

L'immunothérapie est un nouveau type de traitement, décrit en détail dans le *Hors-Série* n° 99: «Cancer. L'arsenal des nouvelles thérapies», qui suscite l'engouement des médecins. Cette méthode consiste à «réveiller» le système immunitaire pour qu'il combatte le cancer. Ces espoirs sont fondés, à en croire le nombre d'études sur cette méthode présentées au congrès annuel de l'Asco (la Société américaine d'oncologie clinique), à Chicago, début juin 2018. L'une d'elles, menée par Gilberto Lopes, de l'université de Miami, aux États-Unis, montre qu'un immunotraitement (en l'occurrence le pembrolizumab, commercialisé par le laboratoire Merck) est plus efficace qu'une chimiothérapie à base de platine, souvent prescrite, contre le plus courant des cancers du poumon. Non seulement les patients ayant reçu l'immunothérapie vivent plus longtemps que les autres, mais en plus, ils ont moins d'effets secondaires. Ce n'est pas encore la fin des chimiothérapies, mais le cancérologue John Heymach l'affirme: «Nous sommes en train de quitter l'ère où la seule solution était la chimiothérapie.»

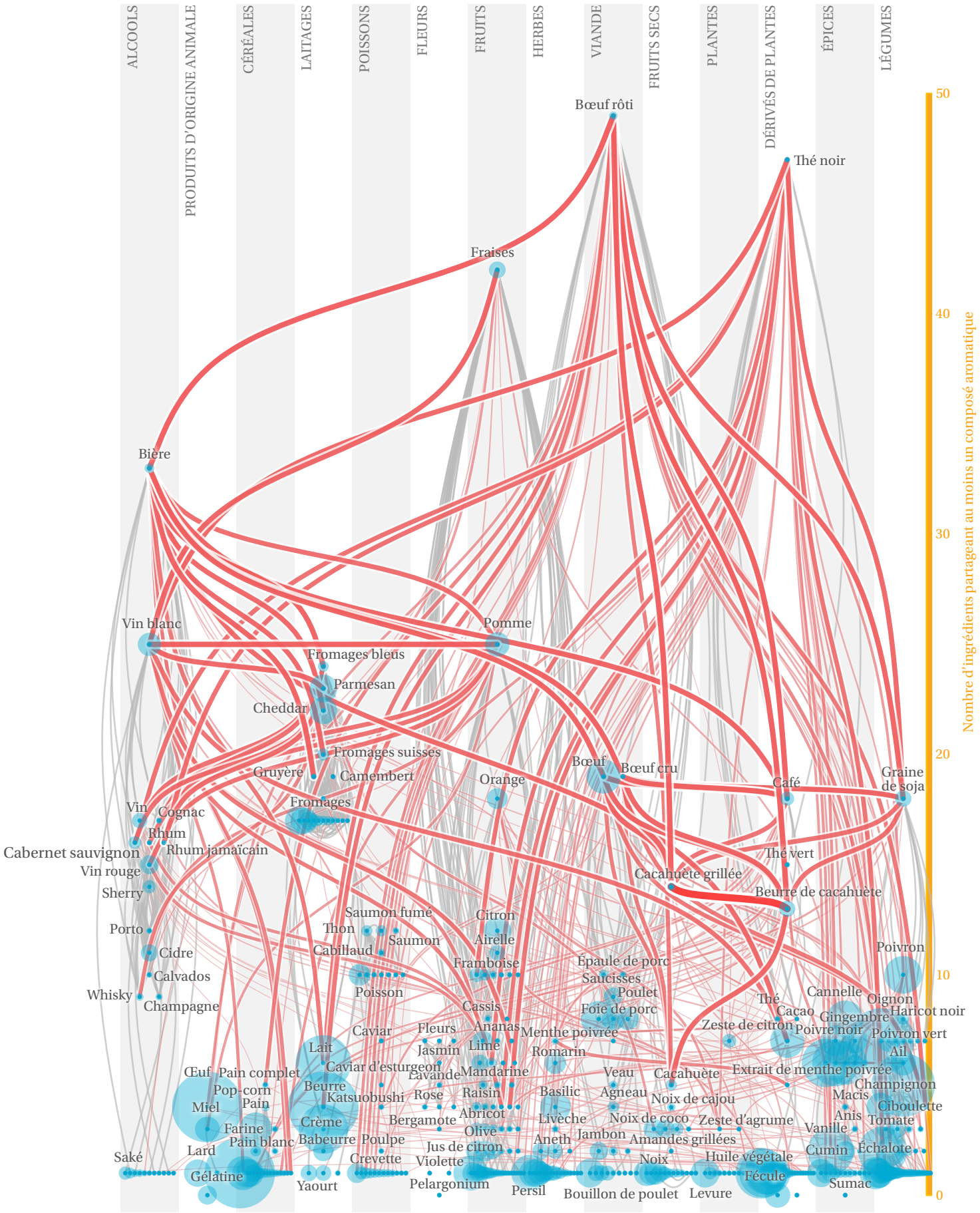
LE COMMUNIQUÉ DE L'ASCO DE G. LOPES : HTTP://BIT.LY/ASCO-LOPES

Coup de pression

La nucléosynthèse primordiale est cette phase de l'Univers pendant laquelle les premiers noyaux d'atomes ont été formés. Détaillée dans le *Hors-Série* n° 97: «Et si le Big Bang n'avait pas existé?», elle a notamment conduit à la production des protons. Des physiciens ont récemment mesuré la distribution de pression subie par les quarks, à l'intérieur de ces particules. Au centre, elle atteint 10^{35} pascals… Rappelons que la pression atmosphérique est de 10^5 pascals.

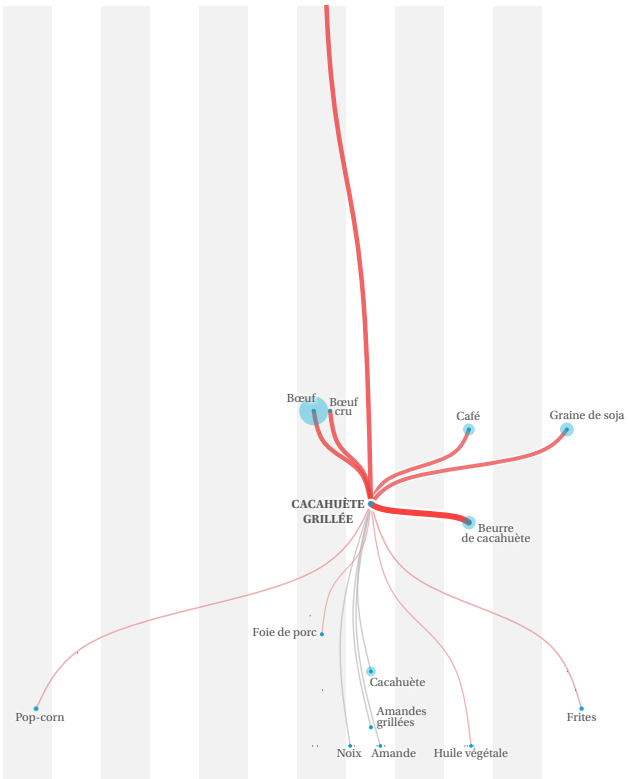
V. BURKERT ET AL., NATURE, VOL. 557, PP. 396-399, 2018

Dans l'intérêt de la science
mathieu vidard
la tête au carré
14:05-15:00
intervenez
franceinter.fr


ALCOOLS
PRODUITS D'ORIGINE ANIMALE
CÉRÉALES
LAITAGES
POISSONS
FLEURS
FRUITS
HERBES
VIANDE
FRUITS SECS
PLANTES
DÉRIVÉS DE PLANTES
ÉPICES
LÉGUMES
Nombre d'ingrédients partageant au moins un composé aromatique
50
40
30
20
10
0
Bœuf rôti
Thé noir
Fraises
Bière
Vin blanc
Pomme
Fromages bleus
Parmesan
Cheddar
Fromages suisses
Gruyère
Camembert
Fromages
Orange
Bœuf
Bœuf cru
Café
Graine de soja
Vin
Cognac
Rhum
Rhum jamaïcain
Cabernet sauvignon
Vin rouge
Sherry
Porto
Cidre
Calvados
Whisky
Champagne
Thé vert
Cacahuète grillée
Beurre de cacahuète
Saumon fumé
Thon
Saumon
Cabillaud
Poisson
Citron
Airelle
Framboise
Cassis
Ananas
Lime
Caviar
Fleurs
Jasmin
Lavande
Rose
Bergamote
Abricot
Olive
Jus de citron
Violette
Pelargonium
Persil
Menthe poivrée
Romarin
Mandarine
Raisin
Basilic
Livèche
Aneth
Épaule de porc
Saucisses
Poulet
Foie de porc
Veau
Agneau
Jambon
Bouillon de poulet
Cacahuète
Noix de cajou
Noix de coco
Amandes grillées
Noix
Levure
Zeste de citron
Zeste d'agrume
Huile végétale
Fécule
Thé
Cacao
Cannelle
Gingembre
Oignon
Haricot noir
Poivre noir
Poivron
Poivron vert
Ail
Extrait de menthe poivrée
Champignon
Macis
Ciboulette
Anis
Tomate
Vanille
Cumin
Échalote
Sumac
Œuf
Pain complet
Pop-corn
Pain
Miel
Farine
Pain blanc
Lard
Saké
Gélatine
Lait
Caviar d'esturgeon
Beurre
Katsuobushi
Crème
Babeurre
Poulpe
Crevette
Yaourt

La recette des bonnes recettes

Quels ingrédients peut-on associer dans une recette de cuisine sans courir à la catastrophe ? Le designer néerlandais Jan Willem Tulp propose une datavisualisation qui peut vous aider. Êtes-vous prêts à tenter le chocolat au caviar ?



La cacahuète grillée a beaucoup en commun avec la graine de soja, mais peu avec le foie de porc !

Combien y a-t-il de recettes de cuisine dans le monde ? Ce serait de l'ordre du million. Pourtant, en théorie, le nombre de recettes possibles est bien supérieur à 10^{15} ! Partant de ces données, qu'ils ont eux-mêmes établies, Albert-László Barabási, de l'université Northeastern, à Boston, aux États-Unis, et ses collègues sont partis en quête de possibles principes généraux qui guideraient l'association d'ingrédients en cuisine. Ils ont notamment voulu tester une hypothèse qui a les faveurs de nombreux chefs aujourd'hui : on mêlerait d'autant plus volontiers des ingrédients qu'ils partagent un nombre élevé de composés aromatiques (on ne parle pas ici de la nature chimique des molécules).

Pour le vérifier, l'équipe a analysé 56 498 recettes en collectant les informations sur la composition chimique des ingrédients correspondants et établi un gigantesque « réseau culinaire » ! Le designer néerlandais Jan Willem Tulp a recueilli les données et les propose dans une datavisualisation simplifiée (*page ci-contre*) interactive sur le site http://bit.ly/Sciam-TFC

Comment lire cette datavisualisation (*ci-contre*) ? Les aliments (*les points bleus*) sont répartis en quatorze catégories (pour autant de colonnes). La taille des points rend compte de la fréquence avec laquelle les aliments apparaissent dans les recettes : on utilise plus souvent du bœuf que du pop-corn. Les lignes (*en gris dans la même catégorie et en rouge entre catégories*) joignent les aliments partageant des composés chimiques. Plus ces substances en commun sont nombreuses, plus la ligne est épaisse.

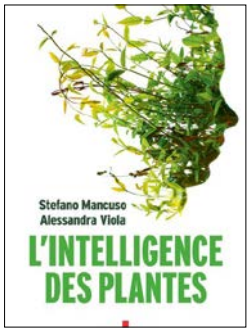
Qu'en est-il de l'hypothèse explorée ? L'étude montre qu'elle est surtout vérifiée en Europe occidentale et en Amérique du Nord, mais beaucoup moins en Asie et dans le Sud de l'Europe. Quoi qu'il en soit, vous pouvez désormais vous lancer dans des associations hardies. Un exemple ? Le cacao se marie bien avec la bière, ou bien la noix de coco avec les fromages à pâte persillée. Bon appétit ! ■

Y.-Y. Ahn *et al.*, Flavor network and the principles of food pairing, *Scientific Reports*, vol. 1, art. 196, 2011.

La datavisualisation interactive : http://bit.ly/Sciam-TFC
Le site de Jan Willem Tulp : tulpinteractive.com/

© Jan Willem Tulp

À LIRE

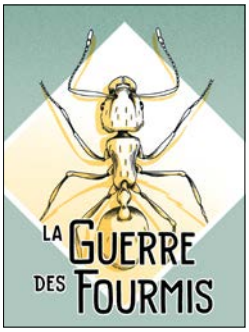


L'Intelligence des plantes

STEFANO MANCUSO ET ALESSANDRA VIOLA

ALBIN MICHEL, 2018
(240 PAGES, 18 EUROS)

Dès l'Antiquité, on s'interrogeait sur l'idée que les plantes puissent avoir une âme. Sans aller jusqu'à leur attribuer une telle « chose », des études récentes ont montré que les plantes sont des êtres capables de calcul, de choix, d'apprentissage, de mémoire… En un mot, et en résistant à tout anthropomorphisme, on peut se demander si les plantes sont intelligentes (au sens où elles sont capables de résoudre des problèmes), à leur façon, et surtout avec leur temporalité, beaucoup plus étendue que celles des animaux. L'un des pionniers de ce champ d'investigation, Stefano Mancuso, professeur à l'université de Florence, en Italie, avec Alessandra Viola, journaliste, fait le point sur les étonnantes facultés du monde végétal.
Le découvreur des potentiels d'action (l'équivalent des signaux qui parcourent nos neurones) dans les racines montre que les plantes sont dotées des mêmes sens que nous et en ont une quinzaine supplémentaire ! Leur sociabilité très développée n'a rien à envier à la nôtre : elles communiquent, se reconnaissent entre elles, ont des personnalités… Cet ouvrage nous invite à regarder différemment notre environnement, pour l'essentiel végétal. Et les auteurs de rappeler que les plantes pourraient très bien vivre sans nous, alors qu'à l'inverse nous leur sommes inféodés. Il est donc essentiel, et urgent, de bien comprendre les plantes, notre avenir en dépend.



La Guerre des fourmis

FRANCK COURCHAMP ET MATHIEU UGHETTI

EN LIGNE
WWW.LAGUERREDESFOURMIS.COM

Connaissez-vous les fourmis gourdes ? En Afrique, ces insectes passent leur vie accrochés au plafond de leur fourmilière, leur abdomen hypertrophié étant devenu un réservoir d'eau sucrée. Bien pratique pour la communauté en cas de sécheresse. Autre cas spectaculaire, les fourmis kamikazes ! Acculées, elles explosent et projettent des substances qui neutralisent les ennemis, par exemple des termites. On découvre ces insectes fascinants dans *La Guerre des fourmis*. Les auteurs de cette bande dessinée, vulgarisateurs chevronnés, s'appuient sur de nombreuses études scientifiques, notamment la thèse de doctorat de Cleo Bertelsmeier, pour raconter l'épopée des fourmis, de leur écologie jusqu'aux problèmes que posent aujourd'hui les quelques espèces envahissantes. En effet, dotées de « superpouvoirs », celles-ci représentent un grand danger pour les écosystèmes et pour les humains. Ainsi, sur l'île Christmas, au large de l'Indonésie, la fourmi folle jaune (*Anoplolepis gracilipes*) décime les populations de crabe rouge, le « nettoyeur » des forêts. Sur le site, la bande dessinée est flanquée de documents, vidéos, images… qui complètent le récit.
Le projet est financé par la fondation Gecina, l'Inra et la Diagonale Paris-Saclay.

À VISITER

Belles plantes

Comment enseigner et transmettre les beautés du monde végétal afin que les élèves en saisissent l'organisation et le fonctionnement ? Au XIXe siècle, la réponse de Louis Auzoux (1797-1880), médecin et industriel, consiste en d'astucieux « modèles » en trois dimensions, entièrement démontables. Fabriqués en papier mâché, ils se prêtent à une production en grande quantité imposée par le succès des premières pièces. Ce sera le cas dans une usine fondée en 1828 spécialement à cet effet à Saint-Aubin d'Écrosville (Eure). Des ateliers sortent des animaux, des écorchés humains ainsi que des fleurs et des fruits géants (ils sont agrandis plus de dix fois). Plusieurs dizaines de ces plantes, achetées à l'époque par les lycées, universités, facultés du monde entier, sont exposées au musée national de l'Éducation, à Rouen, qui propose ainsi un voyage dans l'histoire de la pédagogie et de la diffusion des sciences. C'est aussi l'occasion de découvrir que le fruit du fraisier n'est pas cette masse charnue rouge délicieuse avec de la crème ! Précision : vous pouvez également participer au financement de la restauration de ces modèles, déjà soutenue par la Fondation du patrimoine et la Société d'horticulture de Seine-Maritime.

Belles Plantes, jusqu'au 25 février 2019, musée national de l'Éducation, Rouen : http://bit.ly/2xE4p62

À CLIQUER

La Terre à tout âge

À quoi ressemblait notre planète au moment de l'apparition de la vie pluricellulaire ? De celle des dinosaures ? Des primates ? Pour le savoir, rendez-vous sur le site conçu par l'université Northern Arizona, aux États-Unis. Grâce à une interface interactive, vous décidez de l'époque (parmi 26 possibles) où vous voulez retourner (jusqu'à 750 millions d'années en arrière) et pouvez alors observer à quoi ressemblaient les continents. À chaque arrêt, un petit descriptif vous renseigne sur la période. Le tracé des frontières des pays actuels est aussi superposé, pour mieux vous repérer… ou vous perdre !

http://bit.ly/2sxdtDH

À VOIR

Chimie à grand spectacle

Quel souvenir garder vous de vos cours de chimie ? Ennuyeux ? Ternes ? Pourtant, il y a matière à grand spectacle, comme le prouve une vidéo du site Futura Sciences. Elle montre, à travers cinq expériences saisissantes, comment le simple mélange de quelques produits entraîne des effets fantastiques. Un exemple ? Le mélange de sucre et d'acide sulfurique se traduit par l'érection d'une colonne noire qui monte bien au-delà du bord du récipient. C'est digne d'un film de science-fiction ! Dans une autre expérience, une solution d'iode, d'acide citrique et de sulfite de sodium reste transparente quelques instants puis devient bleu très sombre d'un seul coup. Le *remake* de l'eau transformée en vin. D'autres expériences sont encore plus bluffantes, mais réclament parfois de grandes précautions tant les produits manipulés sont toxiques. En vidéo, pas d'inquiétude !

https://youtu.be/wqgI5WcrJEs

À VISITER

Récifs coralliens, un enjeu pour l'humanité

Selon une étude récente, près d'un tiers de la grande barrière de corail, en Australie, a été victime des vagues de chaleur en 2016. Au Japon, près de l'île d'Okinawa, à peine 1 % du plus grand récif corallien du pays serait encore en bonne santé. Pas de doute, le corail va mal. Pourtant, il est essentiel : les récifs couvrent moins de 0,2 % de la surface des océans, mais ils abritent 30 % des espèces animales et végétales marines. Il est donc urgent de les protéger. Des mesures sont prises, et l'on peut citer la décision de l'archipel d'Hawaii de bannir les crèmes solaires toxiques (seulement à partir de 2021), ou celle de l'Australie d'affecter plus de 300 millions d'euros à la protection et la restauration de la grande barrière. De son côté, l'Unesco a décidé d'alerter la population sur la nécessité de préserver les récifs coralliens de tous les océans. De quelle façon ?

À l'occasion de l'année internationale des récifs coralliens (IYOR 2018), l'institution propose une exposition immersive et multimédia des photographies d'Alexis Rosenfeld, photojournaliste et plongeur professionnel, qui a parcouru le monde (mer Rouge, océans Indien, Pacifique et Atlantique…) pendant deux ans avec la journaliste Alexie Valois. Le photographe a utilisé une technique d'images particulière qui restitue ces paysages sous-marins dans toute leur majesté.

Outre les photographies grand format accrochées le long des grilles du siège de l'Unesco, à Paris, des textes et des interviews filmées, des reportages et des photographies à 360° expliquent les changements auxquels les récifs font face, et donnent la parole à ceux qui les connaissent bien. Cette exposition préfigure la Décennie des Nations Unies pour les sciences océaniques au service du développement durable (2021-2030). Face à la dégradation des océans, il est urgent de trouver des solutions scientifiques pour comprendre les changements en cours, et de mettre fin au déclin de l'Océan, le plus grand écosystème de notre planète, dont les récifs coralliens sont des rouages essentiels. ■

« Récifs coralliens, un enjeu pour l'humanité », jusqu'au 30 août 2018, au siège de l'Unesco, à Paris

Contre la lèpre, tatou compris ?

Un mécanisme immunitaire impliqué dans la lutte contre les mycobactéries (par exemple l'agent de la lèpre *Mycobacterium leprae*) fait intervenir des lymphocytes T nommés Vγ9Vδ2 (du nom du récepteur dont ces cellules sont dotées). On pensait ces cellules caractéristiques des primates chez qui elles représentent de 1 à 5 % des lymphocytes T. Thomas Hermann, de l'université Julius-Maximilian, à Würzburg, en Allemagne, et ses collègues, ont détecté les acteurs (des gènes) de ce système de défense dans d'autres lignées de mammifères placentaires et notamment chez l'alpaga *Vicugna pacos*, le grand dauphin *Tursiops truncatus* et le tatou à neuf bandes *Dasypus novemcinctus*, ce dernier étant justement connu pour être un réservoir de l'agent infectieux de la lèpre. Toutefois, le système à lymphocytes T Vγ9Vδ2 n'est pas fonctionnel chez le tatou : l'espèce ne serait qu'un « témoin » de l'émergence de ce système de défense chez les mammifères placentaires. ■

Cette photographie est extraite du blog *Best of Bestioles* : http://bit.ly/PLS-BOB

A. Fichtner *et al.*, The armadillo *(Dasypus novemcinctus)*: A witness but not a functional example for the emergence of the butyrophilin 3/Vγ9Vδ2 system in placental mammals, *Frontiers in Immunology*, vol. 9, art. 265, 2018.

© Tom Brakefield / GettyImages

D'une explosion à l'autre

Une œuvre exposée à la Fondation Louis-Vuitton nous renvoie 540 millions d'années en arrière, au moment où la vie a connu une explosion de diversité. Veillons à ce que le mouvement inverse n'advienne pas.

Réchauffement climatique, effondrement de la biodiversité, pollutions… L'humanité n'est pas tendre avec la Terre qu'elle dégrade à vive allure et il est difficile d'espérer une inflexion des tendances. Quel monde construisons-nous? Quelle planète laisserons-nous? Ces questions sur la place de l'humain dans l'Univers, ses liens avec son environnement, ses relations avec ses congénères, les autres animaux, les plantes et même le minéral, sont au cœur de l'exposition «Au Diapason du monde», à la Fondation Louis-Vuitton, à Paris. La nouvelle sélection des œuvres de la collection révèle des artistes conscients des dangers qui pèsent sur nous.

L'Homme qui chavire, d'Alberto Giacometti, pourrait être le symbole d'un nouvel équilibre à trouver. Devant tant d'incertitude, on peut aussi suivre le proverbe: «Lorsque tu ne sais pas où tu vas, regarde d'où tu viens.» Une œuvre du Français Pierre Huyle nous fait justement remonter dans le temps, et même très loin!

Il s'agit de *Cambrien Explosion 10*. Conçue en 2014, elle consiste en un aquarium d'eau salée sur lequel semble flotter un bloc de roche volcanique. Au fond, sur du sable noir, évoluent des crabes et des limules. Cet écosystème fait écho à l'explosion du Cambrien, il y a 540 millions d'années, un épisode majeur de l'histoire de la vie.

À cette époque, alors que les organismes étaient essentiellement unicellulaires, on assiste à une explosion des formes de vie, à l'émergence des grands plans d'organisation des animaux actuels (multicellulaires, bilatériens…), à l'installation des interactions complexes telles que la prédation et à l'apparition de nombreux embranchements encore représentés aujourd'hui, notamment les arthropodes, les vertébrés…

L'éponge bleue d'Yves Klein, exposée dans la même salle, aurait pu être immergée dans l'aquarium, car les éponges sont parmi les plus anciens animaux pluricellulaires. La limule est elle aussi pertinente: cet arthropode apparenté aux araignées date d'au moins 450 millions d'années. En revanche, les crabes sont plus récents, le plus ancien fossile datant de 170 millions d'années.

Symbole d'une exubérance originelle à qui nous devons tout, *Cambrien Explosion 10* est aussi un avertissement: la minéralité qui s'en dégage peut préfigurer le monde de demain, lorsque tous nos repères auront… explosé. ■

Cambrien Explosion 10, de Pierre Huyle, est un écosystème artificiel, symbole d'un passé lointain.

«Au Diapason du monde», jusqu'au 27 août 2018, Fondation Louis-Vuitton, Paris.

© Adagp, Paris 2018 © The Estate of Sigmar Polke, Cologne/Adagp, Paris 2018 © Fondation Louis-Vuitton/Marc Domage

PROCHAIN HORS-SÉRIE

en kiosque le 10 octobre 2018

Les plantes

SONT-ELLES DES ANIMAUX COMME LES AUTRES ?

L'intelligence des plantes, et notamment celle des arbres, fait beaucoup parler d'elle, les succès en librairies de plusieurs ouvrages en témoignent. Mais de quoi parle-t-on précisément ? De communication ? De résolution de problèmes ? De sentiments ? Les limites de l'anthropomorphisme ne sont-elles pas outrepassées ? Il est temps de faire le point sur les réelles capacités des plantes.

© Sergei Kornilev / shutterstock.com

Achevé d'imprimer chez Roto Aisne (02) – N° d'imprimeur N°18/05/0030 – N° d'édition : M0770700-01 – Dépôt légal : juillet 2018.
Commission paritaire n° 0922K82079 du 19-09-02 – Distribution : Presstalis – ISSN 1 246-7685 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot.

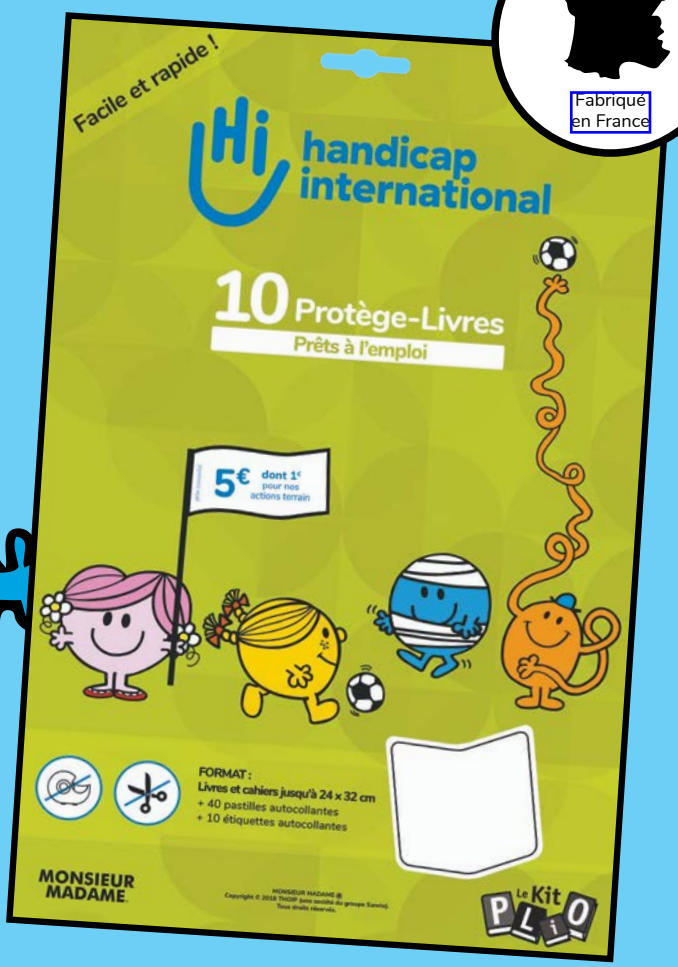
handicap international

PROTÈGE LIVRES ASTUCIEUX

SANS CISEAUX NI RUBAN ADHÉSIF

UN GESTE SOLIDAIRE ET GÉNÉREUX

Fabriqué en France



prix conseillé 5€ dont 1€ pour nos actions terrain

©THOP

NOUVEAU !
RUBRIQUE CONCERTS EN LIGNE

▶ Sur francemusique.fr
vous êtes aux premières loges

- ▶ Plus de 1600 concerts audio et vidéo
- ▶ Gratuits
- ▶ En direct ou à la demande

france musique

Vous allez la do ré !