

POUR LA

Édition française de Scientific American

M 01930 - 100H - F: 7,90 € - RD



AOÛT-SEPTEMBRE 2018

N° 100

# SCIENCE HORS-SÉRIE



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





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.**

**DEVENEZ BÉNÉVOLE**

**01 43 35 49 00**

**[www.petitsprinces.com](http://www.petitsprinces.com)**

**RÉALISEZ  
LES RÊVES  
DES ENFANTS  
GRAVEMENT  
MALADES.**

**Chaque jour, un rêve d'enfant est réalisé.**

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 Ribeiro-Gésippe

**Community manager:** Jonathan Morin

**Conception graphique:** William Londiche

**Directrice artistique:** Céline Lapert

**Maquette:** Pauline Bilbault, Raphaël Queruel  
et Ingrid Leroy

**Révisseuses:** Anne-Rozenn Joubert et Maud Bruguère

**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](mailto: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](http://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.



10-32-2813

/ Certifié PEFC / [pefc-france.org](http://pefc-france.org)

# ÉDITORIAL



**LOÏC MANGIN**  
Rédacteur  
en chef adjoint

## « Laissez jouer la musique »

**E**n 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 interchangeable, 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

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

[pourlascience.fr](http://pourlascience.fr)



## VIBRER À L'UNISSON

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

**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.



## FAIRE VIBRER LA CORDE SENSIBLE

**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**

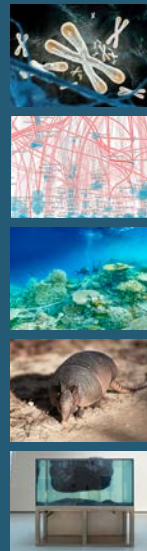
### **Oui, la musique rend intelligent**

*Nicolas Guéguen*

L'apprentissage de la musique  
demande des efforts, mais entraîne  
une pluie de retombées positives.

**P. 108**

### **À lire en plus**



## RENDEZ-VOUS

*par Loïc Mangin*

**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**

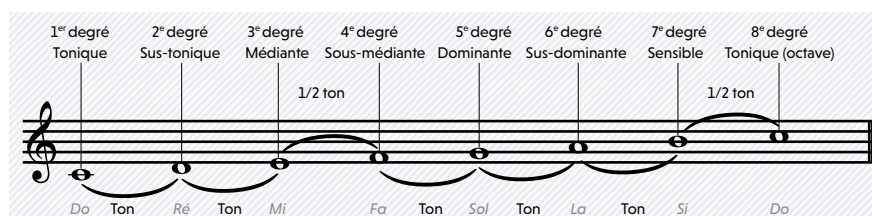
D'une explosion à l'autre

# 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).



## ALTÉRATION

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

## 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...

## 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 :

**U**t queant laxis  
**R**esonare fibris  
**M**ira gestorum  
**F**amuli tuorum  
**S**olve polluti  
**L**abii reatum  
**S**ancte Iohannes

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  |



## 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,  $\frac{1}{2}$  ton, 1 ton, 1 ton, 1 ton,  $\frac{1}{2}$  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,  $\frac{1}{2}$  ton, 1 ton, 1 ton,  $\frac{1}{2}$  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

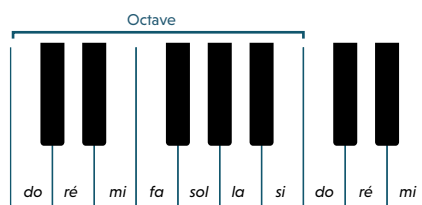
Chaque son peut être la première note d'une gamme. Chaque degré, quelle que soit la note qui le représente, a un nom qui caractérise la position qu'il occupe dans la gamme. À cette position correspond une fonction. Ainsi, le premier degré se nomme tonique, le deuxième sus-tonique, le troisième médiate, 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

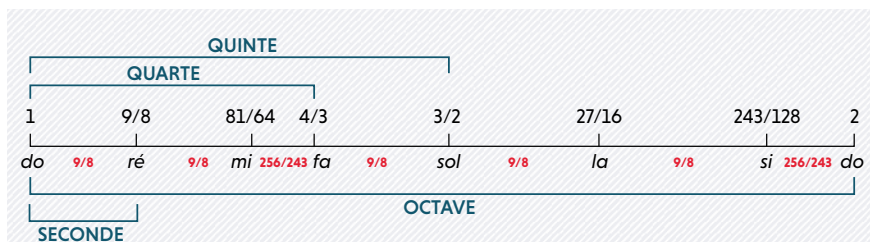
Un tétracorde est une succession de quatre sons (*do, ré, mi, fa*). Par extension, un hexacorde est une succession de six sons. Un accord est un ensemble de sons entendus simultanément, par exemple (*do, mi, sol*). Un accord peut subir ce que l'on nomme des renversements. Ainsi, dans le premier renversement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

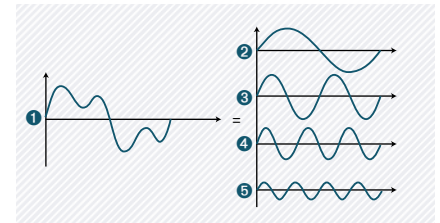
La mesure, le rythme et le mouvement fixent le déroulement temporel d'un morceau. La mesure est la division en parties égales d'un morceau de musique. Une mesure contient plusieurs notes et des silences ; elle est délimitée par des barres de mesure. Une mesure se subdivise généralement en deux, trois 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*, *allegretto* et *moderato*.

## HARMONIQUE

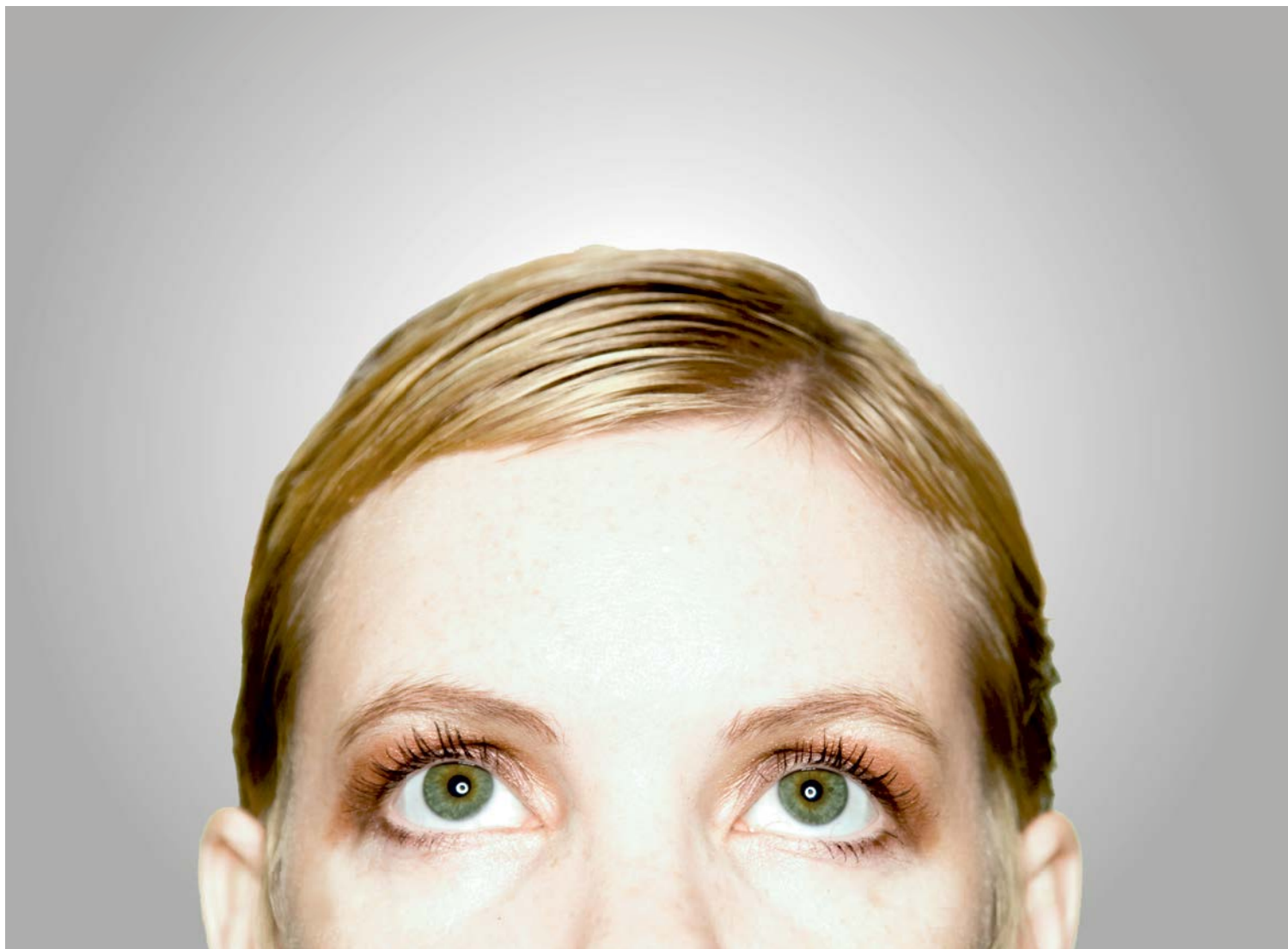
Le son musical (1, *ci-dessous*) est la superposition d'un son fondamental (2) et d'harmoniques (de 3 à 5) dont les fréquences sont des multiples de la fréquence fondamentale (double, triple...). Plus un son est riche en harmoniques, plus il sera riche à l'oreille.



## 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** 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](http://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

#### 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.

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 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

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<sup>e</sup> 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 liait 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 mammoths 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 *religare* 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 Santería, 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

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

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<sup>e</sup> 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 ! ■

PROPOS RECUEILLIS PAR LOÏC MANGIN





# VIBRER À L'UNISSON

Tous les êtres humains sont sensibles à la musique, et ce dès le plus 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...

## 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.





D

**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 troisième 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

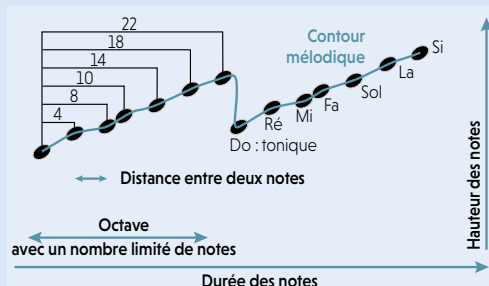
—  
**LES BÉBÉS SONT  
« UNIVERSALISTES » :  
ILS PERÇOIVENT  
LA MUSIQUE  
DE TOUTES  
LES CULTURES  
DU MONDE**  
—

## 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

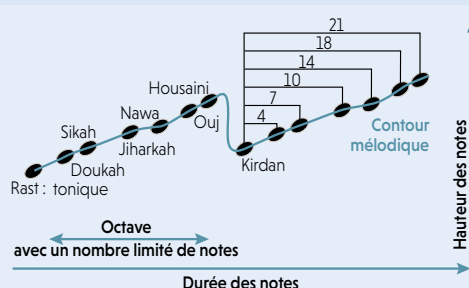
hauteurs des notes qui se fait par niveaux discrets. Ces invariants et d'autres existent dans toutes les musiques du monde. En revanche, le nombre de notes peut changer et la façon dont elles sont accordées dépend de la culture. Nous prenons en exemple la gamme de *do majeur* de la musique

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.

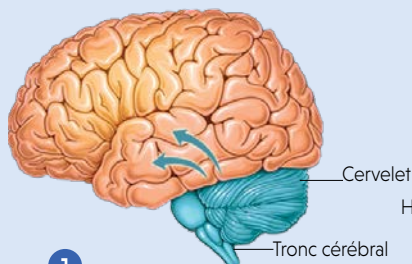
### DES LIMITES COGNITIVES

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

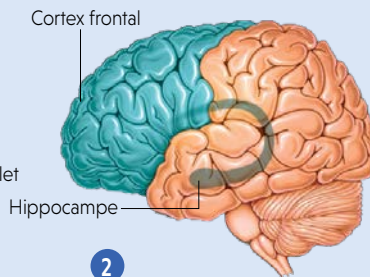
## UNE MUSIQUE DANS LA TÊTE

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.



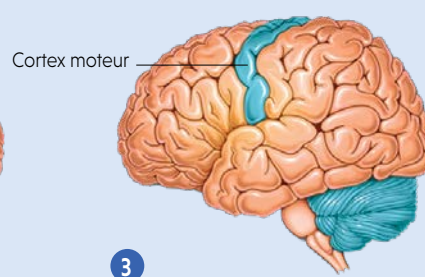
1

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.



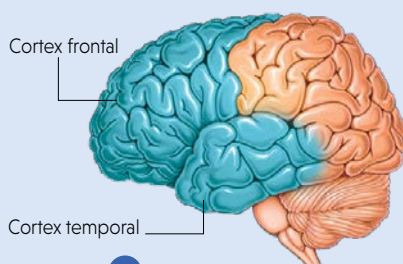
2

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.



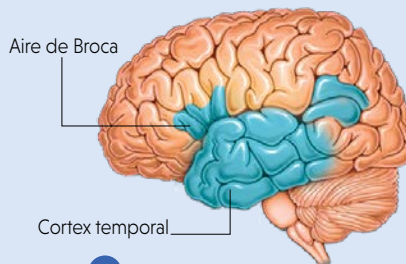
3

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



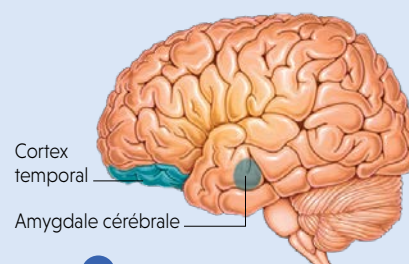
4

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 Bailly

- 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