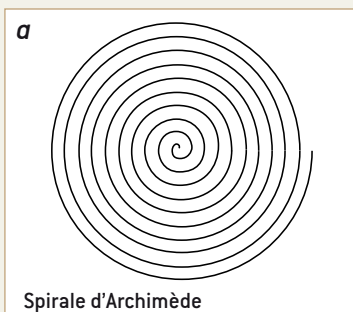
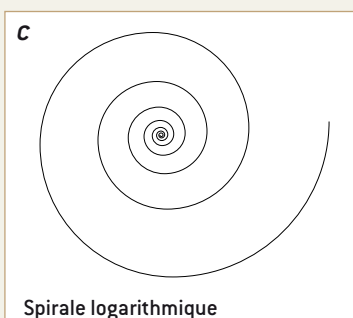




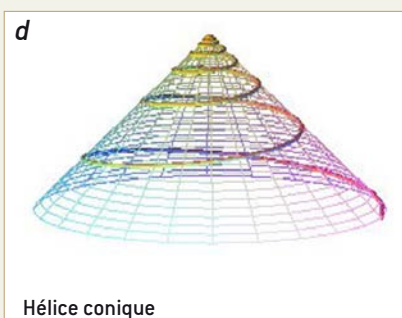
Spirale d'Archimède



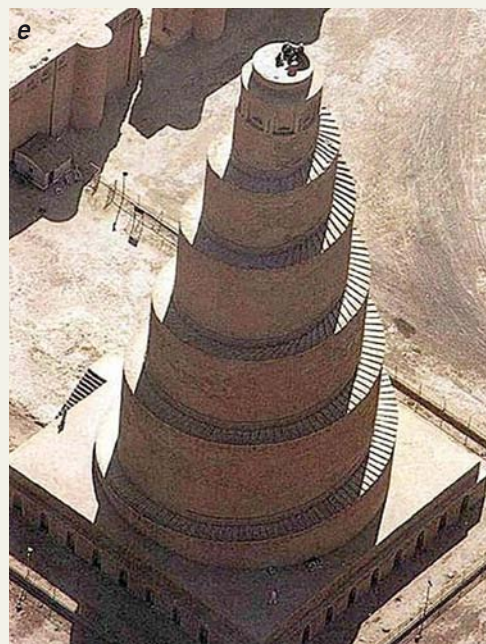
Spirale conique de Pappus



Spirale logarithmique



Hélice conique



© Shutterstock / Jorisio

IDÉES DE PHYSIQUE

Sculpter les sons

Des structures périodiques permettent de réfléchir certains sons ou de les piéger, selon leur fréquence et leur direction.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Lorsque l'artiste espagnol Eusebio Sempere créa dans un jardin madrilène une sculpture constituée d'un réseau bien régulier de tiges verticales d'acier, il ne se doutait pas qu'en ordonnant ainsi l'espace, il sculptait aussi l'ambiance sonore autour de son œuvre : selon l'endroit où il se trouve, le spectateur-auditeur n'entend pas les sons de certaines fréquences provenant de l'autre côté de l'œuvre. À son insu, Sempere avait fabriqué le premier « cristal sonore ». Comment ces structures agissent sur les ondes qui s'y propagent ?

Il a fallu attendre 1995, soit dix ans après le décès de l'artiste, pour que les propriétés acoustiques de la sculpture de

LES AUTEURS



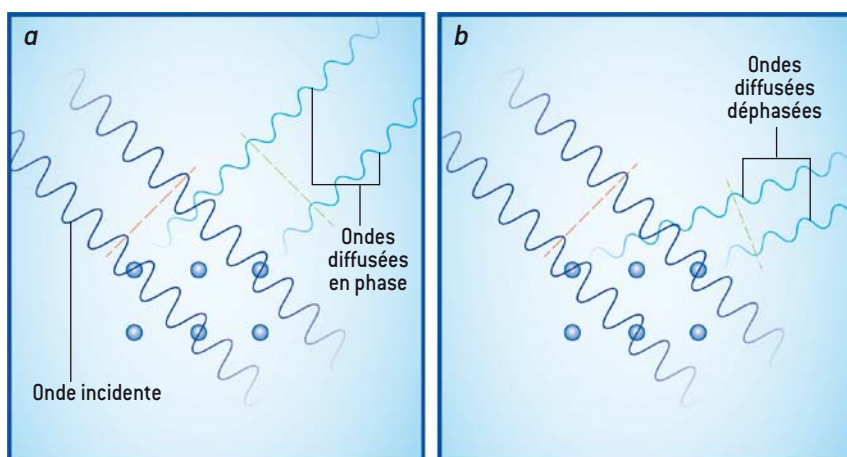
Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

Sempere soient quantifiées par Francisco Meseguer et ses collègues, de l'Université polytechnique de Valence. Leurs mesures ont confirmé que l'atténuation de certaines fréquences sonores n'est pas due à l'absorption des sons par le matériau des tubes, comme dans certains revêtements antibruit. Les tubes d'acier, très rigides, diffusent efficacement les ondes sonores. Sans aucun élément absorbant, vibrant ou résonant, comment la sculpture peut-elle donc filtrer les sons ?

Des pics de diffraction

La réponse est à chercher dans l'agencement régulier des tubes, qui rappelle la répétition périodique d'un même motif atomique dans un cristal. Pour comprendre ce qui se passe, suivons le raisonnement tenu il y a un siècle par le physicien britannique William H. Bragg et son fils (australien) William L. Bragg lorsqu'ils ont interprété les figures de diffraction des rayons X par les cristaux.

Dirigeons un faisceau de rayons X, qui sont des ondes électromagnétiques, sur un cristal (voir la figure 1). Les atomes du cristal diffusent ces ondes dans toutes les directions. La longueur d'onde des rayons X étant comparable à la distance entre deux atomes voisins, la différence de chemin parcouru entre les ondes diffusées par ces atomes dans une direction donnée est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du rayonnement. Lorsqu'on additionne les ondes diffusées par tous les atomes,



1. LORSQU'UNE ONDE INCIDENTE est diffusée par un grand nombre de petits éléments rangés avec une périodicité du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, l'interférence est constructive pour certaines directions de diffusion (a, ondes en phase) et destructive (b, ondes déphasées) pour toutes les autres.

ces décalages provoquent en général un brouillage : l'onde totale diffusée dans la direction considérée est d'amplitude nulle. Certaines directions, qui correspondent à un décalage nul ou égal à un multiple entier de la longueur d'onde, font cependant exception : dans ces cas, les ondes diffusées oscillent en phase et leurs amplitudes s'ajoutent. L'interférence est ainsi constructive, d'où un « pic de diffraction » selon chacun de ces angles.

Les Bragg ont déterminé ces directions en utilisant le fait que les atomes du cristal sont disposés en plans parallèles régulièrement espacés. Les ondes sont diffusées par chacun de ces plans comme s'il s'agissait de miroirs. Or ces ondes diffusées n'interfèrent constructivement que si la différence de chemin pour les ondes renvoyées par deux plans voisins est un multiple de la longueur d'onde. Cette condition implique une relation, la « loi de Bragg », entre la longueur d'onde λ , l'espacement d entre plans atomiques et la différence 2θ entre l'angle d'incidence sur le cristal et l'angle d'un pic de diffraction (la loi de Bragg s'écrit $n\lambda = 2d \sin \theta$, où n doit être un entier).

On peut transposer la loi de Bragg dans le contexte acoustique, les ondes sonores remplaçant les ondes électromagnétiques et les obstacles remplaçant les atomes. Pour un espacement d égal à 10 centimètres (et $n = 1$), on aura alors des effets notables de diffraction pour une longueur d'onde de l'ordre de 20 centimètres, soit une fréquence acoustique de 1,6 kilohertz, située dans l'aigu.

Il existe de nombreuses façons de décomposer un cristal en plans atomiques parallèles (plusieurs orientations de plans sont possibles). L'espacement d qui intervient dans la loi de Bragg peut donc prendre plusieurs valeurs. Cela augmente d'autant le nombre de directions correspondant à un pic de diffraction, pour une fréquence ou longueur d'onde donnée. Quoi qu'il en soit, le résultat à retenir est que, si une onde de fréquence donnée arrive selon plusieurs directions, le réseau cristallin pourra la réfléchir dans certaines directions, tandis qu'il sera transparent vis-à-vis d'elle pour d'autres.

Cependant, les sons du quotidien sont généralement composés de nombreuses fréquences. De plus, notre oreille n'est pas très sensible aux variations d'intensité : diminuer de moitié l'amplitude de l'onde acoustique correspond à une atténuation de six décibels, ce qui est certes audible, mais pas spectaculaire. Comment alors obtenir des effets de diffraction sonore bien marqués dans des conditions réelles ?

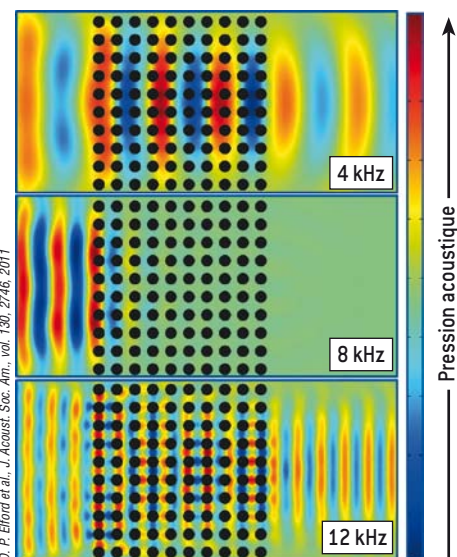
Pour ce faire, on peut augmenter la taille des diffuseurs de telle façon qu'ils occupent une partie importante du volume du cristal (c'est-à-dire de la structure formée de diffuseurs disposés périodiquement). Dans cette situation, l'onde est diffusée dès son entrée dans le cristal par un obstacle et vient immédiatement se réfléchir sur l'obstacle voisin, et ainsi de suite. L'onde pouvant prendre de nombreux chemins pour passer d'une maille du cristal à la suivante, les conditions d'interférence constructive se compliquent.

On montre alors que les ondes de certaines fréquences ne peuvent plus se propager dans le cristal, et cela quelle que soit leur direction. On obtient ainsi un « cristal sonore », structure qui se comporte idéalement comme un miroir pour certaines bandes de fréquences (voir la figure 2).

Des bandes de fréquences interdites

Cette possibilité inspire ingénieurs et artistes qui développent des structures bidimensionnelles composées d'un réseau de tiges verticales, semblables à la sculpture de Sempere. La première idée est de mettre à profit leurs bandes de fréquences interdites pour réaliser des murs antibruit, qui isolent phoniquement les espaces de part et d'autre du mur pour certaines gammes de fréquences.

Un problème à régler est celui des sons graves, qui correspondent aux fréquences inférieures à 300 hertz, donc à des longueurs d'onde supérieures au mètre. Plutôt que d'utiliser des structures exagérément épaisses, les physiciens utilisent des tuyaux creux, fendus ou percés, voire



2. DANS CETTE SIMULATION, une onde acoustique provenant de la gauche rencontre une structure périodique constituée par un réseau carré de cylindres diffuseurs (vus du dessus). Pour certaines bandes de fréquences, notamment à 8 kilohertz (image du milieu), la structure se comporte comme un miroir : l'onde ne peut la traverser.



3. L'ORGAN OF CORTI, une installation artistique mobile constituée de 85 tubes en acrylique, constitue un cristal sonore : certaines fréquences sonores ne peuvent s'y propager, ce qui modifie beaucoup la perception des sons ambiants.

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr



■ BIBLIOGRAPHIE

T. Miyashita, *Sonic crystals and sonic wave-guides*, *Measurement Science and Technology*, vol. 16, pp. R47-R63, 2005.

F. Meseguer *et al.*, *Sound attenuation by sculpture*, *Nature*, vol. 378, p. 241, 1995.

V. Laude *et al.*, *Une introduction aux cristaux phononiques*, www.femto-st.fr/fr/Diffusion/Une-introduction-aux-cristaux-phononiques

emboîtés comme des poupées russes, qui se comportent comme des résonateurs acoustiques aux basses fréquences. En jouant astucieusement sur les matériaux utilisés, leurs propriétés d'absorption, voire leurs irrégularités, on peut couvrir un vaste domaine de fréquences audibles en combinant les effets d'interférence de Bragg pour les fréquences intermédiaires et hautes, et les effets d'absorption des résonateurs pour les fréquences basses. Comme ces tuyaux peuvent être faits de matériaux naturels, un esprit imaginaire peut déjà rêver d'enfermer nos voies respiratoires entre des haies de bambous pour étouffer leur bruit.

En attendant ces applications futures et toujours incertaines, signalons le déjà existant *Organ of Corti* (voir la figure 3). Il s'agit d'un cristal sonore formé de 85 tubes

hauts de 4 mètres et mesurant 22 centimètres de diamètre, placés selon un réseau triangulaire dont le pas fait 30 centimètres. Mobile, le cristal peut être placé dans des environnements sonores riches – zones de trafic intense (comme devant la Cathédrale Saint-Paul à Londres en 2011) ou à proximité de chutes d'eau.

Avec des atténuations qui frôlent les 30 décibels pour plusieurs fréquences comprises entre 1 et 3 kilohertz, domaine où notre oreille est particulièrement sensible, l'*Organ of Corti* modifie considérablement notre perception des sons. En recyclant les « surplus sonores » de notre environnement, il nous invite, selon les promoteurs du projet, à « nous écouter écouter ». Même les utopies artistiques ont besoin de physique ! ■



les conférences

à la Cité des sciences et de l'industrie

entrée libre dans la limite des places disponibles

> mercredi 12 février à 18h

Votre destin est-il inscrit dans vos gènes ?

L'avenir de la médecine prédictive et ciblée

Cette soirée de conférences et débats propose de faire le point sur les connaissances et techniques acquises récemment et sur les questionnements et réflexions éthiques qu'elles soulèvent.

Avec notamment : Jean de Kervasdoué, économiste de la santé ; Christophe Le Tourneau, médecin oncologue ; Pierre Tambourin, directeur général de Genopole.

En partenariat



Avec le soutien de




programme complet sur cite-sciences.fr

Entrez dans l'ère du numérique



- **Version PAPIER + NUMÉRIQUE**
des numéros compris dans
votre abonnement
- **Accès ILLIMITÉ à 18 ans d'archives**

8 €/mois **Plus de 45 %
de réduction !**

60000009



En cadeau le coffret de 2 DVD « Énigmes des planètes »

Un documentaire en six épisodes de 45 minutes
chacun pour explorer le Système solaire
et les planètes grâce à des images de sondes
spatiales et des reconstructions 3D.

Coffret de deux DVD – valeur : 19,99 € – ©Video 2013 Showshank Films

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Service Abonnements Pour la Science • Libre réponse 90382 • 75281 Paris cedex 06

POUR LA
SCIENCE

1. MA FORMULE

☐ **Oui, je m'abonne à l'offre intégrale Papier + Numérique illimité pour 8 €/mois.** Je reçois la version papier de *Pour la Science* et *Dossier Pour la Science* et j'ai un accès offert à leurs versions numériques. J'ai un accès numérique illimité aux archives depuis 1996 (durant la durée de mon abonnement). En cadeau je reçois le coffret de deux DVD « Énigmes des planètes » (60000009).

Mon e-mail (à remplir en majuscules – Obligatoire pour activer mon abonnement numérique)

À réception de ce bulletin, comptez un délai de 4 semaines maximum pour recevoir votre numéro d'abonné. Passé ce délai, merci de contacter le service abonnements à abonnements@pourlascience.fr

2. MES COORDONNÉES

Nom : _____ Prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____ Ville : _____ Pays : _____ Tél. : _____
* Pour le suivi client (facultatif)

3. MON MODE DE RÈGLEMENT

En signant ce formulaire de mandat, vous autorisez *Pour la Science* à envoyer des instructions à votre banque pour débiter votre compte, et votre banque à débiter votre compte conformément aux instructions de *Pour la Science*. Vous bénéficiez du droit d'être remboursé par votre banque selon les conditions décrites dans la convention que vous avez passée avec elle. Une demande de remboursement doit être présentée dans les 8 semaines suivant la date de débit de votre compte pour un prélèvement autorisé.

Note : Vos droits concernant le présent mandat sont expliqués dans un document que vous pouvez obtenir auprès de votre banque.

Mandat de prélèvement SEPA _____ **SCIENCE**

Représentation unique du mandat (ne rien inscrire ci-dessus)

Votre nom _____

Votre adresse _____

Numéro et nom de la rue _____

Code postal _____ Ville _____

Les coordonnées de votre compte _____

Numéro d'identification international du compte bancaire – IBAN (International Bank Account Number)

Code international d'identification de votre banque – BIC (Bank Identifier Code)

Nom du créancier Pour la Science • 8 rue Férou • 75006 Paris

ICS : n° FR92ZZZ426900

Type de paiement Paiement récurrent/répétitif

À _____

Date _____

Signature _____