

Rappelons que la réfraction consiste en une déviation de la lumière lorsqu'elle passe d'un milieu à un autre, par exemple de l'air à l'eau : un bâton plongé dans l'eau, mais dont une pointe est émergée, semble brisé. Ce phénomène avait été décrit par le mathématicien arabe Ibn Sahl à la fin du X^e siècle. Nicéron donne plusieurs exemples d'anamorphoses dioptriques, dont le portrait de Louis XIII obtenu à partir de fragments d'Ottomans (voir figure c).

De façon étonnante, le *Portrait de Louis XV* illustre le doute que Descartes a mis au centre de ses réflexions. Selon

le philosophe, nous devons douter de nos sens, car ils sont parfois trompeurs, les illusions d'optique l'attestent. L'image du bâton brisé dans l'eau le conduit même à s'interroger : nos sens ne nous trompent-ils pas tout le temps ? Louis XV ne s'embarrassa pas de telles considérations et fut « satisfait et très satisfait » de son portrait magique. ■

H. Delalex, « Le portrait caché de Louis XV », dans *Sciences et curiosités à la cour de Versailles*, catalogue de l'exposition, RMN et château de Versailles, 2010.



© Christian Millet



Château de Versailles



IDÉES DE PHYSIQUE

Sonner comme une cloche

*Les qualités musicales d'une cloche dépendent de sa forme.
Et le son produit dépend de l'endroit où le battant frappe.*

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Un tintement dans le lointain qui marque l'heure, la joyeuse sonnerie qui accompagne les mariés à la sortie de l'église...

Les sons des cloches rythment nos vies profanes ou spirituelles, mais d'où vient la qualité musicale de ces instruments ? Qu'est-ce qui détermine les vibrations qui vont persister dans le matériau et, ainsi, seront audibles ? La réponse réside dans la forme de la cloche, dont la conception reste un secret jalousement gardé par les fondeurs.

Une harmonie qui ne va pas de soi

Dans le principe, il est difficile de faire plus simple qu'une cloche. Une pièce en métal homogène, en l'occurrence du bronze, est mise en vibration par le choc du battant. Et, tout comme la membrane d'un haut-parleur, la surface de la cloche met en mouvement l'air environnant et engendre les variations de pression que nous appelons ondes sonores.

La situation est bien plus simple que pour les instruments à vent, où intervient un subtil couplage entre l'embouchure et le tuyau résonnant ; bien plus simple aussi que pour les instruments à cordes, où les cordes, excitées de diverses façons, transfèrent de l'énergie à une paroi vibrante, seule à même d'émettre un son assez puissant.

Pourtant, obtenir une cloche musicale n'est pas immédiat. Lorsqu'on frappe un

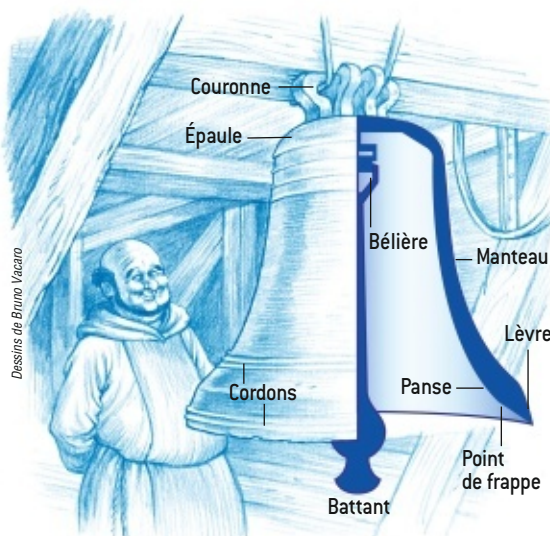
solide, il est rare d'obtenir un son harmonieux et durable. On obtient plutôt un bruit, c'est-à-dire une superposition d'ondes sonores sans ordre particulier.

Or les règles de l'harmonie occidentale requièrent des relations bien précises entre les fréquences émises simultanément. Ces relations sont satisfaites avec les cordes des pianos et des violons. On peut considérer les vibrations de chacune de ces cordes comme une superposition de vibrations sinusoïdales. La fréquence la plus basse, la « fréquence fondamentale », définit la note émise. Les fréquences supérieures, qui déterminent le timbre, sont des harmo-

niques, c'est-à-dire des multiples entiers de cette fréquence fondamentale ; c'est ce qui rend le son harmonieux à nos oreilles.

Prenons maintenant un solide dont la forme est proche de celle d'une cloche et dont on sait calculer exactement les modes de vibration : un cylindre long par rapport à son diamètre et creux, ouvert à ses deux extrémités, comme pour les carillons de porte d'entrée. Un tel tube a toujours une fréquence fondamentale, la plus basse, mais les fréquences suivantes n'en sont plus des multiples entiers [les rapports de fréquence valent 2,68, 7,59, 14,55, ...]. Le son obtenu sera un tintement au son métallique, auquel on peut associer une note, mais qui n'aura pas la rondeur et la musicalité d'un son de cloche.

L'art ancestral des fondeurs de cloches a consisté à trouver la forme la plus appropriée pour un son musicalement juste. Quelques millénaires ont conduit à la forme à symétrie axiale que nous connaissons, du moins en Europe (voir la figure 1). Des écarts régionaux existent et le détail des tracés est encore aujourd'hui rarement connu, les fondeurs ne révélant pas leurs secrets. Mais toutes les cloches ont des formes très proches et produisent, lorsqu'elles sonnent, un « arpège mineur » de cinq notes, dont les fréquences successives sont $0,5f_0$ (octave inférieure, do_2), f_0 (la note fondamentale, do_3), $1,2f_0$ (tierce mineure, mi_3), $1,5f_0$ (quinte, sol_3), $2f_0$ (octave supérieure, do_4). Ce mode mi-



1. LES CLOCHES SEMBLENT être des instruments de musique très simples. Cette apparence est trompeuse : leur forme doit être soigneusement conçue pour qu'elles produisent des sons harmonieux.

neur confère à la cloche son timbre mélancolique caractéristique.

Ce sont les modes de déformation de la cloche qui déterminent ces fréquences. La situation est moins simple que pour une corde tendue, dont chaque mode de vibration dessine un nombre entier de fuseaux (« ventres » de vibration) de même taille, nombre qui correspond au multiple de la fréquence fondamentale émis.

Pour un solide creux tridimensionnel, la question, plus complexe, n'a reçu de réponse définitive que récemment (eu égard au passé de l'instrument), grâce à la théorie des groupes et au développement de l'interférométrie holographique. À la place des fuseaux de la corde, les modes résonnants de la cloche sont définis par les lignes nodales, constituées par les points où l'amplitude de vibration du matériau est nulle (nœuds).

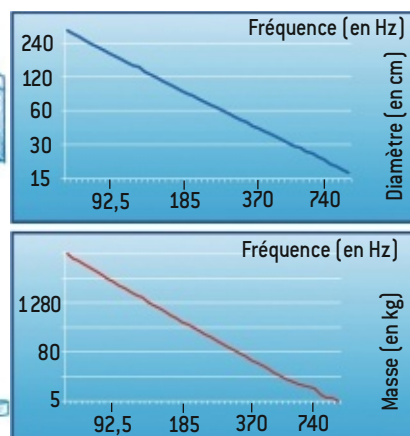
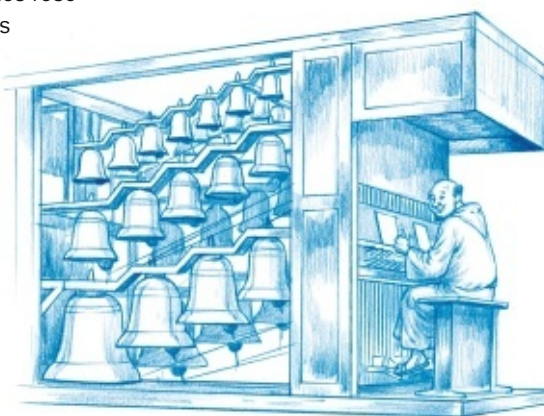
Frapper au bon endroit

Les lignes nodales séparent des domaines qui vibrent en opposition (voir la figure 2), et nous renseignent sur l'endroit le plus adapté pour frapper. Si le battant frappe au niveau d'un nœud, le mode de vibration correspondant ne sera pas excité et la note associée non émise. Si le point de frappe se situe au niveau de la panse (près du bord de la cloche), le battant aura un effet maximal, le bras de levier étant le plus long, et l'on est sûr d'obtenir toutes les notes, même si la proximité de la ligne nodale de la quinte fait qu'elle sera peu sonore.

Réaliser une cloche harmonieuse n'est pas tout. Les fondeurs doivent aussi réaliser des séries de cloches dont les notes sont fixées à l'avance, qu'il s'agisse des quelques cloches d'un clocher ou des 32 cloches et plus d'un carillon. Heureusement, il n'est pas nécessaire de déterminer un nouveau tracé pour chaque cloche : il suffit de réaliser des cloches homothétiques. En d'autres termes, on garde le même profil, mais on multiplie la taille (et l'épaisseur) de la cloche modèle par un coefficient. Avec une suite bien choi-



2. UNE MÊME CLOCHE PEUT VIBRER selon différents modes. Chaque mode est notamment caractérisé par ses lignes nodales (*en blanc*), lieux où l'amplitude de vibration est nulle. Deux domaines séparés par une ligne nodale vibrent en opposition : lorsque les points d'un domaine (*en bleu*) effectuent un mouvement vers l'extérieur de la cloche, les points du domaine adjacent (*en violet*) se dirigent vers l'intérieur. En général, lorsque le battant frappe la cloche, plusieurs modes sont produits simultanément (cinq d'entre eux sont illustrés ci-dessus). Les modes qui sont excités dépendent notamment du point de frappe. Par ailleurs, après être sortie des forges, la cloche peut être accordée en enlevant de la matière en des endroits bien choisis, ce qui modifie légèrement les modes de vibration.



3. UN CARILLON EST CONSTITUÉ d'un ensemble de cloches permettant de couvrir toutes les notes d'une gamme. Pour ce faire, on fabrique des cloches homothétiques : on multiplie la taille et l'épaisseur d'une cloche modèle par un facteur k , déterminé de façon à obtenir la bonne fréquence fondamentale de vibration. Lorsqu'on applique un facteur d'homothétie k , la masse de la cloche est multipliée par k^3 (courbe bleue), tandis que, très approximativement, sa fréquence fondamentale est divisée par k (en fait par k^a , où $a < 1$).

sie de coefficients, on obtient toutes les notes de la gamme chromatique.

Les vibrations d'une cloche étant compliquées, il n'y a pas de relation simple entre le facteur d'homothétie et la fréquence fondamentale de vibration. On en a cependant une approximation grossière en utilisant la loi relative aux cylindres creux : la fréquence fondamentale est proportionnelle au rapport de l'épaisseur sur le diamètre au carré. Pour une homothétie de facteur k (ce qui correspond à multiplier le diamètre et l'épaisseur de la cloche par k , et sa masse par k^3), la fréquence est divisée par k . Ainsi, pour obtenir une variation de trois octaves vers

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>

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

✓ BIBLIOGRAPHIE

N. McLachlan *et al.*, *The design of bells with harmonic overtones*, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 114, n° 1, pp. 505-511, 2003.

T. D. Rossing (éd.), *Acoustics of Bells*, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1984.

le grave, soit une division de la fréquence par huit, on doit multiplier par 512 la masse de la cloche. C'est pourquoi les cloches ont des masses qui vont de quelques dizaines de grammes à plusieurs tonnes !

La seule exception sur l'homothétie concerne les petites cloches qui produisent les sons les plus aigus. La puissance sonore émise dépend en effet de la superficie vibrante. Cela explique qu'une corde émet très peu et que, pour rendre le son audible, on a besoin d'une caisse de résonance, comme pour un violon ou une guitare.

Les cloches présentent au contraire des surfaces d'émission importantes, donc produisent des sons puissants, qui s'entendent de loin. Mais à chaque fois que l'on double la fréquence, on diminue l'aire de la cloche et, partant, la puissance émise par un facteur quatre environ. Même si

l'oreille humaine entend mieux les aigus que les graves, la perte de puissance est telle qu'il faut s'éloigner de la loi homothétique : pour ces petites cloches, on préfère moins diminuer le diamètre (et donc accroître la surface) et augmenter l'épaisseur (pour conserver la fréquence). Là encore, l'art du fondeur est crucial.

La conception des cloches n'est pas un art dépassé : les ordinateurs permettent d'effectuer des simulations numériques et d'améliorer les tracés existants, voire d'explorer des profils innovants. Le fondeur Royal Eijsbouts, aux Pays-Bas, a récemment conçu des cloches qui émettent un arpège majeur. On a aussi fabriqué des cloches harmoniques, qui produisent les mêmes vibrations qu'une corde tendue. Ces innovations sonneront-elles la fin de la mélancolie ou de la joie dans nos campagnes ?



Professeurs, chercheurs, étudiants des filières technologiques, scientifiques et management : inventez avec McDonald's France des solutions inédites pour l'énergie, les emballages ou l'agriculture.

ENVIRONNEMENT
APPEL À PROJETS
4^{ème} EDITION
50 000 €
DOTATION GLOBALE
5 PROJETS MAXIMUM RETENUS
PARTICIPEZ AVANT LE 30 AVRIL 2011
www.mcdonalds.fr/appelaprojets

LES LAURÉATS DES ANNÉES PRÉCÉDENTES :
 El Purpan Toulouse • HEI Lille • Institut EGID Bordeaux
 ISSBA Angers • L'école de design Nantes Atlantique
 LERMAB-UHP Nancy • LGM² Bordeaux • UTT Troyes

SCIENCE & GASTRONOMIE

Quand le sucre fond

En chauffant, le sucre ne fait pas que fondre : il se transforme en divers composés, aujourd'hui identifiés, qui inspireront différentes créations culinaires.

Hervé THIS

La glace fond à 0 °C, une température constante, parce que l'eau n'est composée que d'une sorte de molécules. Cependant, le beurre, composé de molécules variées, commence à fondre à -10 °C et il est complètement fondu vers 50 °C. Alors pourquoi le sucre de table, le saccharose, dont toutes les molécules sont identiques, n'a-t-il pas un point de fusion bien net ? Et quelle importance ?

La température de fusion du sucre augmente avec la vitesse à laquelle on le chauffe. Le glucose et le fructose, eux aussi faits de molécules identiques, présentent également ce comportement anormal. Cela, ce sont les faits de la science des aliments. Parallèlement, en pâtisserie et en confiserie, les artisans ont leurs observations centenaires : les sirops chauffés d'une « certaine » façon ne recristallisent pas quand ils sont ensuite refroidis.

Si l'empirisme confiseur n'est pas à même d'expliquer les observations, sinon par des intuitions souvent fausses (parce que fondées sur l'usage de concepts macroscopiques, et non moléculaires), les chimistes ont expliqué que les sucres se décomposent quand on les chauffe, de sorte qu'il n'y aurait plus de raison pour que la masse chauffée fonde à une température fixe. Le phénomène a été étudié par Joo Won Lee et ses collègues de l'Université d'Urbana-Champaign, dans l'Illinois. Ces chimistes ont séparé les composés apparaissant à des températures différentes.

On n'avait pas attendu 2011 pour étudier la décomposition thermique du saccharose, du glucose ou du fructose, laquelle diffère en présence ou en absence d'eau ; mais, cette

fois, les analyses sont plus subtiles. On tient compte du fait que les sucres sont très hygroscopiques (ils absorbent l'humidité) : les cristaux sont le plus souvent entourés d'eau, venue de l'atmosphère.

Avec les années, on avait identifié que le saccharose, par exemple, peut se décomposer en fructose et glucose. Selon la teneur en eau, on sait aussi que le saccharose peut former des anhydrides de saccharose, par perte d'atomes d'hydrogène et d'oxygène (sous la forme d'eau), ou bien des isomères du saccharose. Pour le fructose, la transformation conduit soit au 5-hydroxyméthylfurfural, à l'odeur de caramel, soit à des anhydrofructoses, soit à des oligosaccharides, c'est-à-dire des enchaînements de quelques maillons (résidu de fructose, résidus de saccharose, etc.). Quand la température augmente encore, une foule de composés se forment par pyrolyse, et l'aventure du caramel commence.

Pour en rester au sucre chauffé, non caramélisé, les chimistes américains ont mis au point des techniques de chauffage et de trempe qui ont permis des analyses aux résultats fiables. À l'aide de ces techniques et par chromatographie en phase liquide, ils ont bien montré que le saccharose se décompose lorsqu'il est chauffé jusqu'au point de « fusion ». Ce point doit donc être plutôt nommé « perte de cristallinité » : il ne correspond pas *stricto sensu* à la fusion du saccharose, mais à la fusion d'un mélange de composés formés par les sucres de base et leurs produits de décomposition.

Comme les diverses réactions de transformation moléculaire s'effectuent à des

vitesse différentes, on comprend mieux pourquoi les vitesses d'échauffement donnent des comportements différents.

De surcroît, J. W. Lee et ses collègues ont mesuré les absorptions et dégagements de chaleur liés aux transformations chimiques qui expliquent, avec d'autres phénomènes comme la perte de cristallinité des produits, les variations des températures de « fusion » et la variété des corps obtenus.

La confiserie gagnera à s'emparer de ces résultats pour orienter ses productions. Elle saura produire des sirops qui ne recristallisent pas si elle sait patiemment orchestrer la dissociation du saccharose en glucose et en fructose, qui viendront s'intercaler entre les molécules de saccharose et bloquer leur assemblage en édifices réguliers, cristallins. Elle maîtrisera les goûts si elle utilise les courbes établies, qui montrent les proportions des divers produits de décomposition du saccharose. Elle y perdra en art, mais y gagnera en régularité... à condition que le gourmand le veuille vraiment : ne sommes-nous pas incessamment partagés entre le désir de retrouver un goût merveilleux et l'envie de la découverte ? ■



Hervé THIS dirige le groupe INRA de gastronomie moléculaire au Laboratoire de chimie d'AgroParisTech. Il est aussi directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Acad. des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé THIS sur www.pourlascience.fr

