

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).

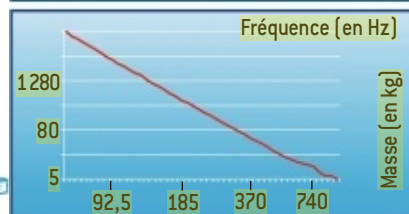
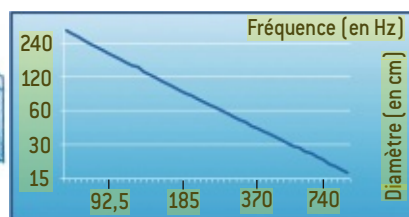
Frapper au bon endroit

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} ÉDITION
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