

IDÉES DE PHYSIQUE

La bouteille qui chante

*De quoi dépend le son produit par une bouteille ou par un ocarina ?
Surtout du volume de l'instrument ou de son embouchure, mais peu de sa forme !*

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

L'ocarina est un étrange instrument. Constitué d'un bec court relié à un corps ovoïde percé de plusieurs trous, il fait penser à une flûte ventripotente [voir l'illustration page 92]. Mais on est surpris lorsqu'on essaie d'en jouer : pour changer de note, ce qui compte n'est pas tant l'emplacement des trous ouverts, comme dans une flûte, que leur nombre ou leur taille. Pourquoi ? Parce que l'ocarina n'est pas le simple tuyau à la base de la plupart des autres instruments à vent : il constitue ce que les physiciens nomment un résonateur de Helmholtz, semblable à celui formé lorsqu'on fait chanter une bouteille en soufflant sur son goulot.

Les résonances d'un tuyau

Si l'on expérimente sur des bouteilles de différentes tailles, on constate que l'on produit des sons différents. *A priori*, nous attribuons cela à la taille de la bouteille, la pratique des instruments à vent nous ayant appris que la hauteur de la note produite dépend de la longueur du tuyau de l'instrument.

Mais un examen plus approfondi jette le doute sur cette interprétation. Deux bouteilles de même hauteur, mais de formes distinctes, peuvent produire des notes différentes et toutes deux bien plus graves que

LES AUTEURS

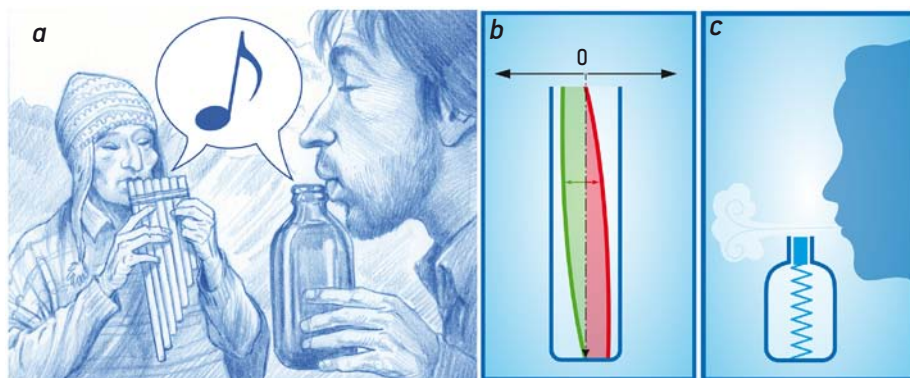


Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

celle obtenue avec un tube parfaitement cylindrique d'une flûte de pan, de même taille.

Pour un tel tube, la théorie classique indique qu'il se forme une onde sonore stationnaire (onde dont les nœuds et les ventres d'oscillation de l'air ont des positions fixes) et que la longueur d'onde dépend de la longueur du tuyau. La longueur d'onde résonante d'un tube ouvert à une extrémité et fermé à l'autre est égale à quatre fois la longueur du tube. Ainsi, avec un tube d'un peu moins de 20 centimètres, on obtient le *la* de la tonalité d'un téléphone.

Pourquoi cela ne s'applique-t-il pas à une bouteille ? Pour le comprendre, il faut



UNE BOUTEILLE ET UN TUBE DE FLÛTE DE PAN ont des propriétés acoustiques distinctes. Ils peuvent produire la même note, même si leurs longueurs diffèrent beaucoup [a]. Pour un tube cylindrique fermé à l'une des extrémités, la longueur du dispositif contient un quart de longueur d'onde du son produit, avec un nœud de vibration de l'air à l'extrémité fermée et un ventre à l'extrémité ouverte [b ; en vert et vers la gauche : l'amplitude du déplacement de l'air ; en rouge et vers la droite : l'amplitude de la surpression]. Pour une bouteille, le son dépend de la taille relative du goulot et du volume de la partie large. Ce système peut être modélisé en première approximation comme un système masse-ressort, où la masse correspond à l'air contenu dans le goulot et le ressort à l'air contenu dans le reste de la bouteille [c].

Dessins de Bruno Vacaro

approfondir la physique des résonances. Le plus simple des résonateurs est le résonateur mécanique constitué d'une masse attachée à un ressort. Les oscillations observées correspondent à des échanges périodiques entre l'énergie cinétique de la masse et l'énergie potentielle du ressort.

Quand la masse atteint une position extrême, sa vitesse, donc son énergie cinétique, est nulle, tandis que l'allongement ou la compression du ressort, donc l'énergie potentielle, est maximale. Au contraire, lorsque la masse est à sa vitesse maximale, le ressort est détendu. Par ailleurs, la période d'oscillation est proportionnelle à la racine carrée de m/k , où m est la masse et k la « raideur » du ressort.

Il en est de même dans tous les dispositifs oscillants, qui conjuguent une composante inertielle, associée à l'énergie cinétique, et une composante élastique, associée à l'énergie potentielle. Dans les vibrations acoustiques, c'est l'air qui joue ces deux rôles : les déplacements des couches d'air fournissent l'énergie cinétique, et la pression l'énergie potentielle.

L'extrémité ouverte d'un tube cylindrique est sous pression atmosphérique ; les variations de pression y sont donc minimales, tandis que les couches d'air sont libres de se déplacer avec de fortes amplitudes. L'orifice du tuyau est donc un « nœud » d'oscillation pour la pression et un « ventre » pour la vitesse (voir la figure page précédente).

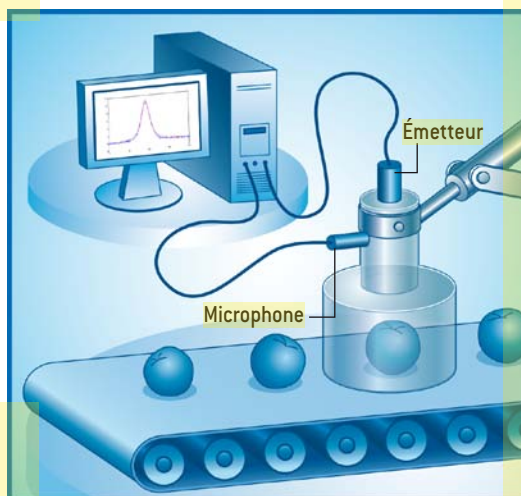
À l'extrémité fermée du tuyau, c'est l'inverse. Le mouvement de l'air est bloqué par le fond, d'où un nœud pour la vitesse et un ventre pour la pression. La plus courte distance nœud-ventre correspondant à un quart de longueur d'onde, on comprend pourquoi la longueur du tuyau est le quart de la longueur d'onde de résonance acoustique.

La description qui précède fournit aussi une analogie avec le résonateur masse-ressort. Dans le tiers supérieur du tuyau, l'air vibre et se déplace en bloc. Il est peu comprimé et joue un rôle analogue à celui d'une masse qui oscille. Dans le tiers inférieur, les déplacements sont faibles et la

compression est importante : l'air y joue alors le rôle de ressort. Dans la partie intermédiaire, les deux effets sont présents.

Que se passe-t-il dans une bouteille ? Le goulot change radicalement le comportement acoustique. Une onde sonore y est aussi présente, comme dans le corps de la bouteille. Mais à la frontière entre les deux régions, si la pression n'est pas affectée, le changement de diamètre modifie la vitesse des couches d'air : le débit d'air devant être le même, le rapport des vitesses à cette frontière est inversement proportionnel au rapport des sections.

Par conséquent, si l'on réduit la section de l'extrémité d'un tube d'un facteur 10, la masse d'air que contenait cette extrémité est divisée par 10, tandis que sa vitesse est multipliée par 10 (si l'on conserve la même vitesse dans la partie inférieure du tube). Conclusion : dans cette extrémité, l'énergie cinétique de l'air, égale à la moitié du produit de la masse par le carré de sa vitesse, est dix fois plus élevée. Tout se passe comme si l'on avait augmenté la masse m du résonateur masse-ressort équivalent.



MESURE ACOUSTIQUE DU VOLUME D'UN PRODUIT sur une chaîne de fabrication. La technique est fondée sur le fait que le son produit avec un récipient en forme de bouteille dépend du volume d'air contenu dans la partie large.

BIBLIOGRAPHIE

M. P. Silverman et E. R. Worthy, **Musical mastery of a Coke™ bottle : Physical modeling by analogy**, *The Physics Teacher*, vol. 36, pp. 70-74, 1998.

G. R. Smith et P. D. Loly, **The great beer bottle experiment**, *Amer. J. of Physics*, vol. 47, pp. 515-518, 1979.

A. Cummings, **Acoustics of a wine bottle**, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 31, pp. 331-343, 1973.



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

Le rôle du goulot : un levier de vitesses

Il s'ensuit que la présence d'un goulot augmente la période des oscillations, d'où un son plus grave par rapport à un tuyau cylindrique. Et l'effet est d'autant plus marqué que le goulot est long.

Comme le son est plus grave dans la bouteille, la longueur d'onde, qui pour un tube était égale à quatre fois sa longueur, devient très supérieure à la taille du système. En pratique, on peut donc considérer que l'amplitude des oscillations de la pression dans le corps de la bouteille est presque constante. Le corps de la bouteille joue alors le rôle de ressort, un ressort dont la raideur est d'autant plus petite que la quantité d'air est élevée : ce qui compte est le volume du corps de la bouteille, et non sa forme.

Dans le goulot en revanche, c'est l'amplitude des oscillations de la vitesse qui



CONTRAIREMENT À UNE FLûTE, L'OCARINA produit un son qui ne dépend pas de la position des trous non obturés. Seule compte la superficie totale représentée par ces trous.

est uniforme. L'air qu'il contient joue alors uniquement le rôle de masse. L'expérience le confirme : des bouteilles de formes et diamètres divers, mais de même volume, produisent le même son. Il faut toutefois que les goulots soient identiques, car l'air du goulot intervient dans la hauteur du son par sa masse et par la surface de contact avec l'intérieur de la bouteille. Pour fixer les idées, avec une bouteille de un litre et un goulot de 22 millimètres de diamètre et long de trois centimètres, on obtient un son de fréquence inférieure à 200 hertz environ (un *sol* grave).

Nous sommes maintenant en mesure de comprendre l'ocarina, un résonateur de Helmholtz muni d'une embouchure de flûte. Ce récipient ventru en bois ou en céramique est percé de plusieurs trous qu'on bouche avec les doigts. En les débouchant successi-

vement, on modifie la hauteur du son produit, avec des doigtés qui peuvent être analogues, par commodité, à ceux d'une flûte.

On s'aperçoit toutefois assez vite que ce qui compte vraiment dans un ocarina est la surface totale libérée, et pas tant la position des trous ouverts : à mesure que l'on débouche les trous, c'est autant de petits goulots que l'on crée. Comme ce qui se passe dans le volume est uniforme, on obtient le même effet qu'avec un goulot unique, mais de section équivalente.

Évidemment, avec seulement dix doigts, il est difficile d'obtenir sur un ocarina un large registre de notes... à moins d'opter pour un ocarina multichambres. Ces derniers sont munis de deux, trois, voire quatre embouchures par lesquelles vous pouvez souffler et jouer ainsi un plus grand nombre de notes, au prix d'une difficulté accrue. ■



Palais de la Découverte



les conférences

au Palais de la découverte

Entrée libre dans la limite des places disponibles

THÈME (Des)équilibres

> les mercredis 4, 11, 18, 25 mars et 1^{er} avril à 19h

Avec : Gilles Bœuf, Marie-Pierre Cassagne, Jean-Louis Dufresne, François Gemenne, Jade Lindgaard, Jean-François Soussana, Freddy Vinet.

Cycle de 5 conférences
Coup de chaud sur la planète
 Les conséquences prévisibles du changement climatique sur l'agriculture, la biodiversité, les migrations humaines, la vulnérabilité des sociétés, nos modes de vie.

programme complet sur palais-decouverte.fr

Avec soutien de



