

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

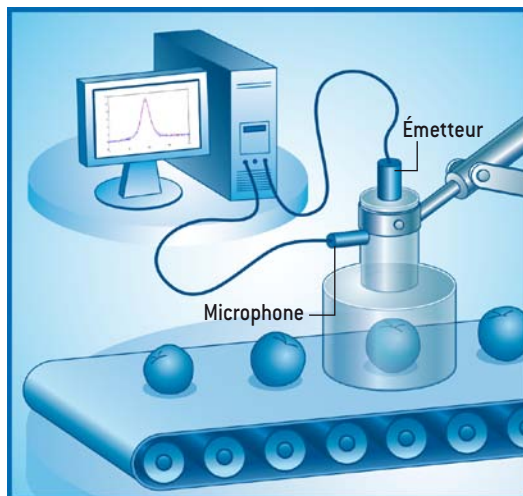
compression est importante : l'air y joue alors le rôle de ressort. Dans la partie intermédiaire, les deux effets sont présents.

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.

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



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



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. ■



les conférences



au Palais de la découverte

THÈME (Des)équilibres

Entrée libre dans la limite des places disponibles

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

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





QUESTION AUX EXPERTS

Combien de temps peut-on tenir sans dormir ?

L'organisme supporte de veiller plusieurs jours sans dommages à long terme.

Marie-Françoise VECCHIERINI



En 1965, Randy Gardner, un étudiant américain de 17 ans, a passé 264 heures (11 jours et 11 nuits) sans dormir. C'est, aujourd'hui encore, la plus longue privation de sommeil enregistrée. William Dement, de l'Université Stanford, a vérifié l'absence d'endormissement en enregistrant l'activité du cerveau.

Peut-on aller encore plus loin ? À la fin de sa longue veille, l'étudiant était plus instable, plus agressif et peinait à se concentrer. Ses gestes étaient moins précis, ses paroles moins fluides, ses réactions plus lentes. Il avait aussi quelques hallucinations visuelles. Mais ce n'était pas un zombi pour autant ! Il a d'ailleurs pu tenir une conférence de presse et jouer au basket.

On a étudié la privation totale de sommeil pendant quelques jours dans d'autres expériences – la plus ancienne remonte à 1896. Il a aussi été constaté une apparition progressive de ces symptômes, les hallucinations survenant en dernier. À mesure que la veille s'allonge, certains sujets semblent adhérer à ces hallucinations et perdre leur esprit critique.

Selon des rumeurs circulant sur Internet, la privation de sommeil pourrait avoir des conséquences encore plus graves. Un disc-jockey aurait eu des hallucinations et des délires paranoïaques après avoir passé plus de huit jours sans dormir. En 2012, un Chinois serait mort à la suite d'une veille de trois jours, rivé à la Coupe du monde de football à la télévision. Mais ces deux cas sont sans doute dus à la consommation

de substances psychotropes, telles que l'alcool ou les amphétamines, plus qu'à la privation de sommeil.

Une trop longue privation de sommeil peut-elle alors se révéler fatale et si oui, en combien de temps ? Difficile de savoir, puisque pour des raisons éthiques évidentes, il est impossible de réaliser l'expérience ! Les études menées sur des animaux pour préciser les conséquences de la privation de sommeil donnent quelques indices, mais ne permettent pas d'extrapoler à l'homme, car les résultats varient selon les espèces. Les poussins meurent en quatre à six jours, les rats en 21 à 30 jours. Leur température interne baisse notablement et des troubles immunitaires finissent par les tuer. En revanche, les chats semblent s'endormir avant que les conséquences ne soient fatales, même lorsqu'ils reçoivent des stimulations sonores ou lumineuses intenses et prolongées.

Une insomnie de quatre mois!

Chez l'homme, plusieurs pathologies entraînent des insomnies sévères et se soldent par la mort du patient. C'est le cas dans l'insomnie fatale familiale, et parfois dans l'encéphalite léthargique et la chorée fibrillaire de Morvan. Concernant cette dernière pathologie, un patient est resté quatre mois presque sans dormir. De brèves phases de sommeil persistaient tout de même, conduisant ce sujet à s'assoupir quelques dizaines

de minutes au total dans la journée. En outre, les dysfonctionnements liés à ces maladies sont tels qu'on ne peut attribuer la mort aux seules insomnies.

En l'absence de pathologie, la durée de veille supportable dépend probablement des individus. En outre, le système immunitaire semble tout de même affecté par le manque de sommeil. Plusieurs expériences l'ont montré dans le cas d'insuffisances chroniques. Une analyse sanguine a également révélé une réaction inflammatoire chez un volontaire resté éveillé pendant trois jours.

Faut-il alors s'inquiéter après une ou deux nuits blanches ? Vous ne serez en tout cas plus très performant au travail. À la fin des années 1990, une expérience sur des étudiants volontaires a montré qu'au-dessous de cinq heures de sommeil, l'efficacité baisse notablement. En revanche, il n'y a pas lieu de s'inquiéter d'éventuels effets à long terme. Dans toutes les expériences sur l'homme, les marques d'une longue veille disparaissent rapidement. Précisons tout de même que ces expériences, réalisées par des volontaires, manquent souvent de rigueur ou de contrôle scientifique, et que la privation chronique de sommeil reste néfaste. Quant à Randy Gardner, il aurait récupéré après une seule bonne nuit de... 14 heures et 40 minutes ! ■

Marie-Françoise VECCHIERINI
est praticien hospitalier au Centre
du sommeil, à l'Hôtel-Dieu de Paris.