

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY
professeur de physique
à l'université
Pierre-et-Marie-Curie,
à Paris



ÉDOUARD KIERLIK
également professeur
de physique à l'université
Pierre-et-Marie-Curie

LES TUBES HURLEURS

Des tuyaux en accordéon que l'on fait tourner rapidement produisent un son de hauteur bien définie. Ce n'est pas le cas avec des tuyaux lisses. Quel rôle jouent donc les corrugations des parois?

Le «tube hurleur» est un jouet musical qui chante lorsqu'on le fait tourner rapidement. La particularité de ce tuyau souple, long d'environ 70 centimètres, est d'être «corrugué», c'est-à-dire d'avoir des parois en accordéon comme un tuyau d'aspirateur. En plus d'être passablement assourdissante, cette production spontanée de son peut devenir problématique dans des installations industrielles, notamment les conduites de gaz. Les vibrations engendrées sont parfois assez intenses pour infliger des dégâts aux structures avoisinantes. Quelle est l'origine de ce son? Et de quoi dépend sa hauteur?

UN ÉCOULEMENT FORCÉ POUR PRODUIRE LE SON

Commençons par expérimenter en saisissant un tube hurleur par son extrémité et en le faisant tourner de plus en plus vite. À faible vitesse de rotation, rien ne se

passé. À partir d'une certaine vitesse, le tube produit une note, c'est-à-dire un son de hauteur (ou fréquence) bien définie. Accélérons encore le mouvement: à un deuxième seuil de vitesse, la note change et devient plus aiguë, puis, à un troisième seuil, la note devient encore plus aiguë, et ainsi de suite...

Avec un peu d'entraînement, le musicien amateur jouera à volonté quatre ou cinq notes différentes. Notes dont le mélomane reconnaîtra les intervalles. Entre les deux premières notes, il y a ainsi une quinte, c'est-à-dire un rapport de fréquences de $3/2$. Une octave sépare la troisième note de la première, ce qui correspond à une fréquence double. Ainsi, comme pour un clairon, les notes produites correspondent aux multiples $2f$, $3f$, $4f$ d'une fréquence fondamentale f (qui, elle, n'est pas produite de façon audible).

On reconnaît là les fréquences de résonance d'un tuyau cylindrique ouvert à ses

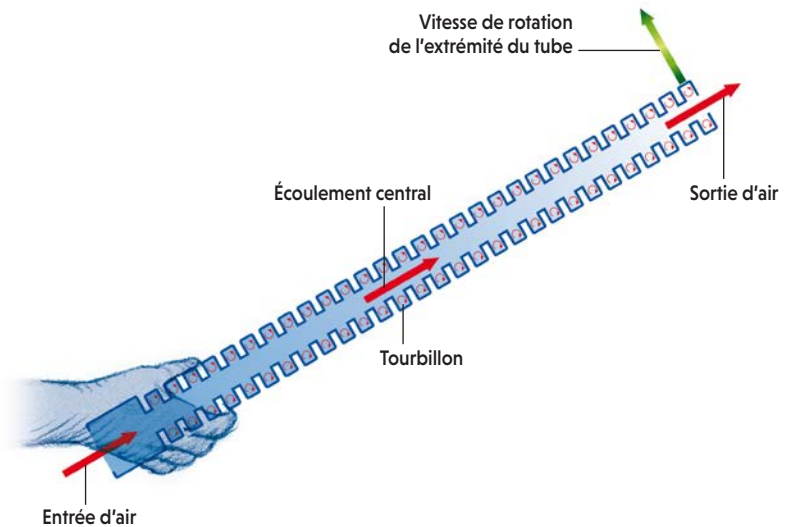


deux bouts: la période des ondes sonores est un sous-multiple ($1/n$, n étant un entier) du temps que met une perturbation acoustique pour effectuer un aller-retour dans le tuyau. Jusque-là, rien d'étonnant. Toutefois, une question se pose. Dans un clairon, le son a pour origine les vibrations des lèvres du musicien. Or ici, point de lèvres, ni d'anche comme pour la clarinette ou le hautbois, ni même de biseau comme pour la flûte. D'où vient alors le son?

Expérimentons à nouveau. En regardant l'extrémité mobile du tuyau fendre l'air, on pourrait penser qu'il se produit à cet endroit un phénomène équivalent à celui qui permet de jouer une note en

CIRCULATIONS D'AIR

Dans un tube que l'on fait tourner rapidement, l'air intérieur est soumis à la force centrifuge. Il en résulte un écoulement d'air le long du tube, de l'extrémité tenue en main vers l'extrémité en rotation. Lorsque le tube comporte des corrugations (structure en accordéon par exemple), cet écoulement fait naître périodiquement un tourbillon au niveau de chaque corrugation. Lorsque la fréquence d'émission des tourbillons coïncide avec l'une des fréquences de résonance du tube, un son intense de cette fréquence est produit.



Des sons musicaux peuvent être produits en faisant tourner des tubes en accordéon ou en percutant des tubes lisses.

soufflant perpendiculairement au tube d'une flûte de Pan ou à une bouteille. Mais ce n'est pas le cas: si l'on bouche avec le pouce l'extrémité du tuyau tenue en main, l'instrument devient muet.

En revanche, si l'on souffle dans une gaine électrique (aux parois en accordéon) de faible diamètre, un son est émis. La même expérience échoue avec un tube hurleur: son diamètre est trop important pour que la bouche crée un écoulement d'air de vitesse suffisante. L'émission de son, qui disparaît par ailleurs avec un tuyau lisse, provient donc de l'effet conjugué des corrugations de la paroi et d'un écoulement d'air dans le tuyau.

Cette réponse suscite alors deux questions: pourquoi la rotation du tuyau provoque-t-elle un écoulement d'air dans celui-ci? Et pourquoi un écoulement d'air dans un tuyau corrugué engendrerait-il un son?

Répondons rapidement à la première question. L'air contenu dans le tuyau est soumis à une force centrifuge d'autant plus importante qu'il se trouve près de l'extrémité en mouvement. Or comme les deux extrémités du tuyau sont ouvertes et en contact avec de l'air à pression atmosphérique, l'air n'est pas retenu et se met donc en mouvement. Il s'établit un flux d'air continu, qui entre au niveau de

la main et sort par l'extrémité en mouvement rapide.

Un bilan complet à partir de l'équation de Bernoulli, loi bien connue de la mécanique des fluides, prédit que la vitesse d'écoulement (radiale) dans le tube est égale à la vitesse de son extrémité en rotation. Pour un son de 600 hertz (Hz), l'extrémité décrit des cercles d'environ 60 centimètres de rayon à raison de >



Les auteurs ont dernièrement publié: **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).

> 2,2 tours par seconde, soit une vitesse d'un peu plus de 8 mètres par seconde.

Et l'origine du son? Suivons l'air dans son écoulement dans le tuyau. L'air de la section principale du tube frotte sur l'air quasi stagnant contenu dans les corrugations. Ce cisaillement entraîne l'émission périodique de tourbillons sur le bord de la corrugation. Lorsque leur fréquence d'émission coïncide avec une fréquence de résonance du tuyau, on a un fort couplage entre l'onde acoustique et l'écoulement aérodynamique, lequel lui fournit alors son énergie: un son puissant est produit.

Vérifions la plausibilité de cette hypothèse. Les corrugations de notre tuyau ont une période spatiale de 6,2 millimètres. Le temps que l'air met à parcourir cette distance est donc de l'ordre de 0,8 millièmes de seconde; il lui correspond ainsi une fréquence de 1230 Hz. Certes, c'est le double de la fréquence du son émis, mais cet écart s'explique parfaitement si l'on prend en compte les effets de viscosité, qui ralentissent l'écoulement près des parois.

EFFETS DE BOUT ET VITESSE DU SON

Cependant, l'histoire ne s'arrête pas là. Comparons la fréquence sonore (600 Hz) produite par notre tuyau avec ce que prédit la théorie. Pour un tube long de 76,5 centimètres et une vitesse du son dans l'air ambiant de 345 mètres par seconde (à 24 °C), on s'attend à une fréquence fondamentale de 225 Hz et à une deuxième fréquence harmonique à 675 Hz, plus aiguë que notre son à 600 Hz. La loi des tuyaux ne serait-elle vraie qu'à 10 % près?

Pas du tout, et les facteurs d'orgue le savent depuis longtemps. Dans la description des résonances acoustiques d'un tube ouvert, on suppose que la pression de l'air aux extrémités est strictement égale à la pression atmosphérique. Or c'est aussi à l'extrémité du tuyau que les vibrations de l'air sont maximales – et heureusement, car c'est cela qui permet au son de sortir du tuyau.

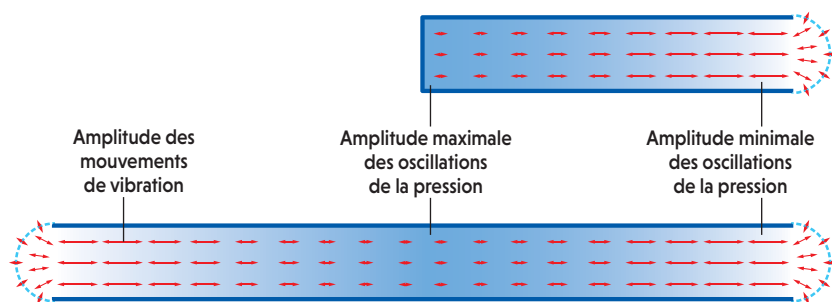
La couche d'air à l'extrémité du tuyau va et vient périodiquement et produit donc les ondes acoustiques, comme la membrane d'un haut-parleur. Autrement dit, l'air vibre aussi à l'extérieur du tuyau et ces vibrations sont notables dans une région de taille à peu près égale au rayon du tuyau. Pour un tuyau ouvert aux deux extrémités, tant que le diamètre du tuyau est petit devant la longueur d'onde, il faut ajouter à la longueur du tuyau une correction égale à 1,22 fois le rayon. Cette correction

VIBRATIONS AU-DELÀ DES EXTRÉMITÉS

Dans le mode de vibration le plus simple de l'air contenu dans un tuyau fermé à l'une de ses extrémités, la longueur du tube est égale au quart de la longueur d'onde sonore. L'amplitude des oscillations de pression de l'air atteint son maximum au niveau de l'extrémité fermée et décroît jusqu'à l'extrémité ouverte. Pour l'amplitude des mouvements de l'air, c'est le contraire.

Avec un tuyau ouvert à ses deux extrémités, le mode de vibration le plus simple (mais d'intensité trop faible pour être audible) est analogue, avec une configuration symétrique, et la longueur du tube correspond à une demi-longueur d'onde.

Cependant, dans les deux cas, l'air vibre aussi notablement dans une petite région (délimitée ici en pointillé) de l'atmosphère libre, ce qui modifie la longueur effective des tubes à prendre en compte dans les calculs.



explique parfaitement la relation entre note émise et longueur pour les «boomhackers», des tubes à percussion lisses destinés aux enfants.

Mais pour notre tube hurleur, elle ne suffit pas. Pourquoi? Les corrugations sont en cause. La propagation du son dans un milieu résulte de la conjugaison d'effets inertiels et élastiques. Plus un milieu est dense et plus il est compressible, plus la vitesse du son est faible. Comme les corrugations bloquent le mouvement de l'air qu'elles contiennent le long de l'axe du tube, cet air ne contribue pas à l'inertie. En revanche, il peut se comprimer radialement et contribue donc à l'élasticité. Les corrugations conduisent ainsi à une compressibilité effective plus importante, sans augmentation de l'inertie. Résultat: la vitesse de propagation du son y est plus faible que dans un tuyau lisse.

On montre plus précisément que la vitesse du son est plus basse d'un facteur égal à la racine carrée du quotient entre le volume total du tube (corrugations comprises) et le volume de sa section principale (sans corrugations). Pour notre tube hurleur, on obtient ainsi une estimation de la vitesse du son à 310 mètres par seconde.

Heureusement, pour jouer avec des tubes hurleurs, on n'a pas besoin de ces subtilités. Beaucoup de groupes en font désormais usage pour enrichir leurs interprétations sonores et profiter de leurs aspects colorés et décalés. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Rajavel et M. G. Prasad, **Acoustics of corrugated pipes : A review**, *Applied Mechanics Reviews*, vol. 65(5), article 050801, 2013.

M. P. Silverman et G. M. Cushman, **Voice of the dragon : The rotating corrugated resonator**, *European Journal of Physics*, vol. 10(4), pp. 298-304, 1989.

H. Levine et J. Schwinger, **On the radiation of sound from an unflanged circular pipe**, *Physical Review*, vol. 73(4), pp. 383-406, 1948.