

> 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.

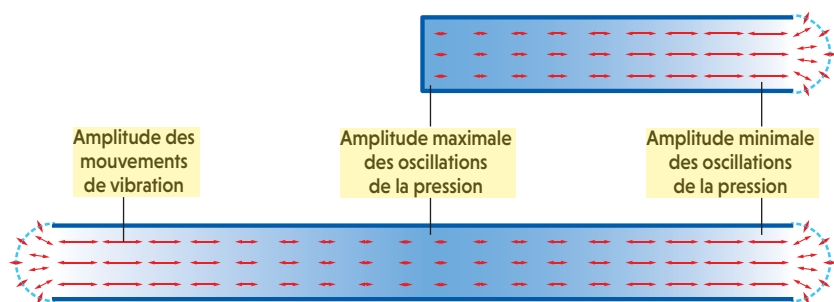
La couche d'air à l'extrémité du tuyau va et vient périodiquement et produit donc les ondes acoustiques, comme la membrane d'un haut-parleur. Autrement dit, l'air vibre aussi à l'extérieur du tuyau et ces vibrations sont notables dans une région de taille à peu près égale au rayon du tuyau. Pour un tuyau 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.