



mais un petit apport d'énergie suffit à amorcer la réaction, en l'occurrence une combustion lors de laquelle le salpêtre joue le rôle de comburant en libérant de l'oxygène, celui-ci oxydant le soufre et le carbone (les combustibles). La poudre étant confinée, la combustion a produit une grande quantité de gaz d'abord sous pression puis, celui-ci se libérant, une détonation, une onde de choc et un fort effet de souffle. Le bruit aurait été entendu à plus de 120 kilomètres de là ! On comprend alors les dégâts observés et la terreur des personnages sur le tableau d'Egbert van der Poel. La fumée dégagée par la réaction chimique est

suffisamment dense (et normalement blanche) pour obscurcir en partie le ciel, comme on le voit sur la toile.

Que sait-on de l'origine du drame ? Peu de choses. Selon certains, quelques étincelles projetées de la lanterne de Cornelis Soetens, le gérant de la poudrerie, entré peu avant le drame dans l'édifice, seraient en cause. En tout cas, la surprise a dû être immense, car la poudrière s'était installée dans la plus grande discrétion, au point que l'entrepôt, en grande partie souterrain, était connu de quelques-uns comme le « Secret de la Hollande ». La ville fut vite reconstruite, grâce à la solidarité nationale, et en 1659,

de l'autre côté de la ville, Vermeer put peindre une *Vue de Delft* beaucoup plus sereine, même si sa contemplation est à l'origine de la mort de Bergotte, le personnage de Proust. ■

Le site du Rijksmuseum :
<https://bit.ly/2NZIMXE>



L'auteur a publié :
Pollock, Turner, Van Gogh,
Vermeer et la science...
 (Belin, 2018)

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

CHANTER DEUX MÉLODIES À LA FOIS

En jouant sur la forme de notre conduit vocal, il est possible d'émettre des sons comportant deux notes bien distinctes : c'est le chant diphonique.

Écoutons chanter Anna-Maria Hefele : à notre grande stupéfaction, on entend s'élever une double mélodie – une mélodie aiguë accompagnée d'une voix basse. Cette cantatrice et musicienne allemande pratique avec talent le chant diphonique, technique vocale développée depuis longtemps parmi les peuples des steppes d'Asie. Cette technique a été introduite en Europe il y a une cinquantaine d'années, et étudiée depuis. Elle permet de produire simultanément une note grave, appelée «bourdon», et une note aiguë. Comment est-ce possible ?

PRODUIRE ET SÉLECTIONNER DES HARMONIQUES

Pour nous lancer dans la diphonie, commençons par suivre les conseils de Tran Quang Hai, ethnomusicologue au CNRS : créons un puissant son grave en faisant vibrer notre larynx (on doit bien le sentir avec les doigts), puis prononçons les voyelles «i» et «u» en les liant avec un timbre nasillard. Après quelques

tentatives, nous entendons bien, outre le son grave, un son plus aigu ! Hélas, avec cette technique, il sera bien difficile d'obtenir des notes musicales. Mais l'analyse de ces sons nous mettra sur la voie.

L'onde sonore que nous émettons en parlant ou en chantant correspond à des vibrations périodiques de l'air. On peut décomposer cette onde en une superposition de vibrations sinusoïdales, chacune caractérisée par une fréquence et une amplitude. C'est ce que l'on appelle le «spectre». La fréquence la plus basse, la fondamentale, détermine la hauteur du son, donc la note émise. Dans le cas du chant diphonique, la fréquence de la note plus aiguë est toujours un multiple entier (typiquement d'un facteur compris entre 3 et 13) de la fréquence fondamentale : il s'agit donc d'un «harmonique» du bourdon.

Analysons ce qui se passe avec un trombone à coulisse, particulièrement simple à modéliser puisque son corps est constitué d'un long tuyau de diamètre constant. Comme la voix et la plupart des instruments de musique, chaque note émise par le trombone est la superposition

d'une fondamentale et de ses harmoniques, dans des proportions qui caractérisent le «timbre». La longueur du tuyau détermine la fréquence fondamentale ainsi que celles des harmoniques, qui en sont des multiples entiers.

Toutefois, l'instrumentiste peut moduler les proportions de ces diverses composantes en modifiant l'embouchure. Un tromboniste comme l'Australien James Morrison peut ainsi jouer tel ou tel harmonique plutôt que la fondamentale, voire combiner les deux ou plus dans le cas des sons multiphoniques, et ce sans toucher à la coulisse, c'est-à-dire sans changer la longueur du tuyau.

Comment faire avec notre voix ce que James Morrison fait avec son trombone ?

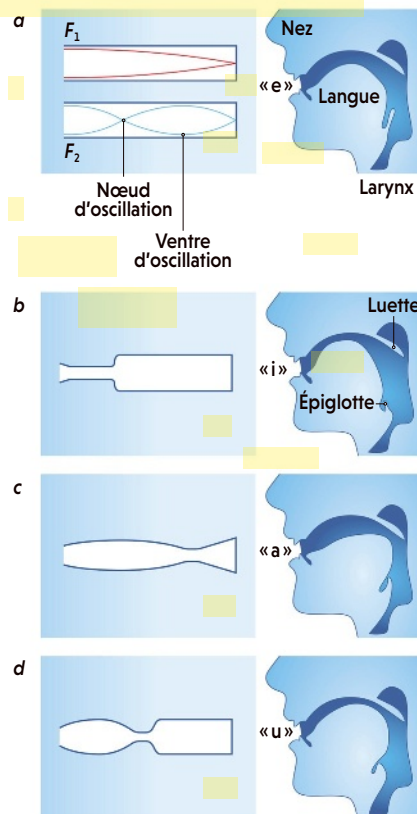


FORME DU CONDUIT VOCAL ET RÉSONANCES

En chantant une note, les cordes vocales produisent un son composé d'une fréquence fondamentale et de ses harmoniques (les multiples entiers de la fréquence fondamentale). Cependant, la forme du conduit vocal donne lieu à des résonances qui renforcent certaines fréquences au détriment d'autres. Par exemple, quand on prononce un « e », le conduit vocal est assimilable à un tube cylindrique semi-ouvert, pour lequel il y a résonance à $F_1 = 500$ Hz environ, $F_2 = 1\,500$ Hz, $F_3 = 2\,500$ Hz, etc. (a). Pour d'autres voyelles, le conduit vocal change de forme (b, c, d) ; cela modifie les fréquences de résonance et, par conséquent, les fréquences vocales les plus audibles, ce qui produit un timbre différent.



Dans le chant diphonique, traditionnellement pratiqué dans certaines régions d'Asie, le son émis comporte simultanément deux notes dominantes distinctes, l'une étant un harmonique de l'autre. Le chanteur ou la chanteuse peut ainsi faire entendre deux mélodies différentes en même temps.



Comparons les modes de production du son. Les deux sons sont produits par des vibrations : celles des lèvres pour le trombone, et celles des cordes vocales pour la voix. Il y a toutefois une différence majeure.

Pour le trombone, un couplage fort entre le résonateur formé par le corps de l'instrument et les lèvres impose à ces dernières une période de vibration : le temps que met une perturbation de pression à faire un aller-retour dans le tuyau. C'est cette période qui fixe la fréquence fondamentale et ses harmoniques.

En revanche, la fréquence fondamentale des vibrations des cordes vocales est presque entièrement déterminée par leur longueur et leur tension. L'onde sonore produite par ces vibrations ne ressemble

guère à une onde sinusoïdale (sauf lorsqu'on parle doucement) : le son produit est riche en harmoniques, dont l'amplitude décroît assez lentement à mesure que la fréquence considérée augmente.

LE CONDUIT VOCAL, UN RÉSONATEUR ACOUSTIQUE MODULABLE

Comment alors changer le timbre de notre voix et chanter ainsi les différentes voyelles ? En modifiant la forme du résonateur acoustique constitué par notre pharynx, notre bouche et nos cavités nasales.

Lorsque la bouche est légèrement ouverte et la langue « à plat », le conduit vocal d'un adulte est correctement modélisé par un tube d'une longueur L

d'environ 17 centimètres, fermé au niveau du pharynx et ouvert au niveau de la bouche. Si l'on note c la vitesse du son, les résonances possibles sont les multiples impairs d'une fréquence fondamentale égale à $c/(4L)$, soit environ 500 hertz (Hz). Chacune de ces résonances correspond à une onde acoustique stationnaire (voir l'encadré ci-dessus), où les déplacements des couches d'air présentent des nœuds (minima) et des ventres (maxima) d'oscillation.

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

