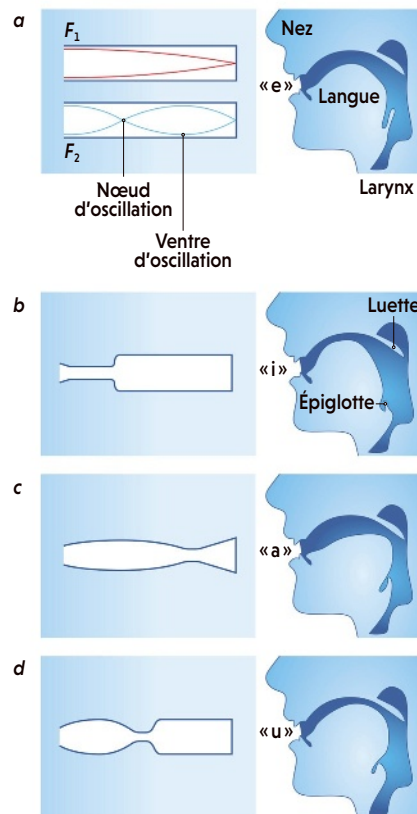


FORME DU CONDUIT VOCAL ET RÉSONANCES

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).



> Comme les tissus sont mous et absorbent beaucoup l'énergie acoustique, les résonances à 500 Hz, 1500 Hz, 2500 Hz..., que l'on appelle «formants» dans le langage de la phonétique, ne sont pas très marquées: ces fréquences sont amplifiées en intensité, mais les autres fréquences du son émis par les cordes vocales gardent des intensités non négligeables.

La première conséquence de cela est qu'il est impossible d'éliminer du son émis la fréquence fondamentale des vibrations des cordes vocales, même si elle est bien plus basse que 500 Hz: elle demeure audible, surtout si l'on permet à l'onde acoustique de se propager dans la cavité nasale en abaissant la luvette. Cela explique la persistance du bourdon et le timbre nasillard du chant diphonique.

La deuxième conséquence est que ces résonances, même peu saillantes, déterminent le timbre du son émis en renforçant les amplitudes associées à certaines fréquences par rapport à d'autres.

Lorsqu'on modifie la configuration du conduit vocal, en changeant la position de notre langue dans notre bouche par exemple, on déforme le tuyau cylindrique en un tuyau à section variable, ce qui modifie les formants et produit d'autres voyelles (voir l'encadré page 81).

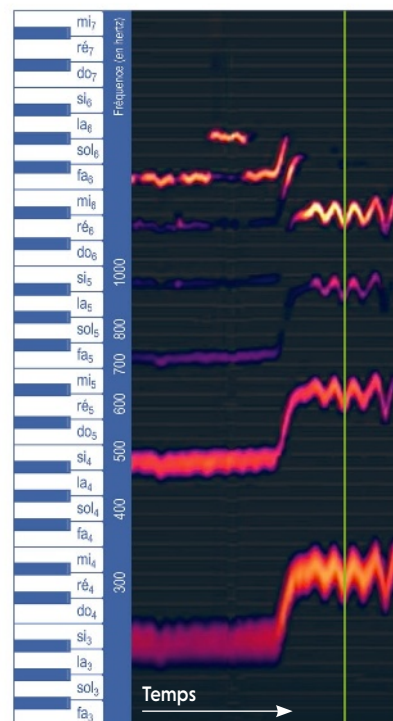
MODIFIER LES FRÉQUENCES DE RÉSONANCE

Cette modification est due au changement des fréquences de résonance de l'appareil phonatoire. Pour le comprendre, considérons un ventre du déplacement oscillatoire de l'air. C'est un endroit où la pression acoustique est nulle et où les couches d'air ont une vitesse maximale. L'énergie acoustique y est donc sous forme d'énergie cinétique, liée à l'inertie de l'air, et non pas d'énergie potentielle, liée à sa compressibilité. Si l'on réduit la section du conduit vocal à cet endroit (en remontant la langue vers le palais par exemple), la masse d'air y diminue, mais sa vitesse augmente puisque le débit doit rester constant: il s'ensuit que l'énergie cinétique s'accroît et renforce l'inertie par rapport à la compressibilité. Comme dans un système masse-ressort, cela diminue la fréquence de résonance.

C'est ce qui arrive peu ou prou pour le premier formant lorsqu'on prononce un «i». Comme l'illustre la technique décrite au début, les formants de certaines voyelles sont déjà suffisants pour que notre oreille puisse distinguer un son autre que le bourdon. Il faut cependant y

UNE NOTE ET L'UN DE SES HARMONIQUES

En ajustant la forme de son conduit vocal, un chanteur peut faire en sorte que les phénomènes de résonance privilégient une note fondamentale et un harmonique d'ordre assez élevé, auquel cas ces deux notes seront entendues distinctement. Tel est le principe du chant diphonique. Par exemple, dans ce sonogramme d'Anna-Maria Hefe, à l'instant indiqué par la ligne verticale verte, la chanteuse produit simultanément deux notes dominantes: un ré₆ et, deux octaves au-dessus, un ré₈ (l'intensité du son est ici codée par la couleur, de foncée pour une faible intensité à claire pour une intensité élevée).



renoncer pour améliorer la sélection des fréquences par les formants.

Tran Quang Hai nous donne ainsi une seconde technique, inspirée par les maîtres mongols du chant diphonique, beaucoup plus difficile à maîtriser: émettez un «e» avec un son laryngé et prononcez un «L» en maintenant le bout de la langue au contact du palais et enfin un «o» ou un «a» très nasalisés. Dans cette configuration, la langue sépare le conduit vocal en deux cavités couplées. Comme elles sont plus petites que le conduit vocal, elles contribuent à l'apparition de formants de fréquences élevées, et facilitent ainsi l'émission de sons aigus.

Cela a d'ailleurs un intérêt musical. En travaillant avec des harmoniques élevés, par exemple les 4^e, 5^e, 6^e, 7^e et 8^e harmoniques, on peut obtenir des rapports de fréquences qui correspondent à des intervalles utilisés dans la musique occidentale. Ainsi, entre le 4^e et le 5^e harmonique, on a une tierce, entre le 4^e et le 6^e une quinte, entre le 4^e et le 8^e une octave. Entre le 4^e et le 7^e, on a un peu plus qu'un intervalle de sixte et cela sonnera un peu faux. Ce registre de notes suffit cependant à Anna-Maria Hefe pour nous éblouir en interprétant des chants traditionnels ou des œuvres plus contemporaines. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. E. Hall, **Musical Acoustics**, Brooks/Cole (3^e édition), 2001.

R. D. Kent, **Vocal tract acoustics**, *Journal of Voice*, vol. 7(2), pp. 97-117, 1993.

T. C. Levin et M. E. Edgerton, **The throat singers of Tuva**, *Scientific American*, septembre 1999, pp. 80-87.

SUR LE WEB

Tran Quang Hai, **Le chant des harmoniques**: <https://images.cnrs.fr/video/606>
<https://bit.ly/2Pavsz0>

Vidéos d'Anna-Maria Hefe: <https://bit.ly/3m1N24i>
<https://bit.ly/31HHVgF>