

# La voie humaine et le résonateur Helmholtz

Nous entendons souvent dire d'une personne que "a une voix", en référence au fait qu'elle peut bien chanter. Ou bien qu'une personne a une voix qui résonne, faisant allusion au fait qu'elle est une bonne oratrice. Mais quels sont les phénomènes physiques derrière la voix et sa résonance? Il se trouve que le concept le plus important est le résonateur de Helmholtz, qu'on va explorer en relation à la voie humaine.

## La voie humaine

Si on parle de point de vue biophysique, le concept de voix est représenté par la production de sons par la vibration des cordes vocales par un être humain [1]. Les sons sont étudiés par le domaine de la physique appelé l'acoustique. Les sons sont formés par des ondes longitudinales de pression de l'air. La voie humaine est caractérisée en principal par la fréquence des sons, appelé aussi la hauteur de la voix, et par le nombre des mots possibles par minute. En général, la voie des femmes a une hauteur plus grande que celle des hommes. Les chanteurs d'opéra s'entraînent pour obtenir des fréquences encore plus hautes pour les femmes et encore plus basses pour les hommes. Les fréquences les plus hautes sont celles d'un enfant. La fréquence moyenne des différents types de personnes est résumée dans le tableau suivant [1].

Géant	Contrebass	Bas	Bariton	Contrealto	Mezzo-soprano	Soprano	Enfant
31 Hz	43 Hz	61 Hz	87 Hz	174 Hz	246 Hz	348 Hz	492 Hz

Comme une parenthèse, les femmes peuvent entendre mieux que les hommes les sons de haute fréquence, grâce à l'évolution de notre espèce pour que les femmes entendent mieux les enfants, même s'ils sont plus loin. Pour cela, les étudiants mâles ont besoin que la voie de l'instructeur ou de l'institutrice soit plus basse que celle dont on a besoin les filles [2]. Dans le monde des animaux, incluant les humains, on perçoit une voix plus basse comme plus autoritaire, à laquelle on fait de la conscience plus aisément. Inconsciemment les animaux mâles baissent leur voix quand ils montent sur l'échelle sociale de leur groupe. Pour les humains on observe aussi que les femmes politiciennes ou sur des positions de management, ont fait des exercices conscientes pour baisser leur voix par rapport à 60 Hz, et aussi inconsciemment les femmes en général ont baissé leur voix de 30 Hz dans les dernières décennies [3] [4].

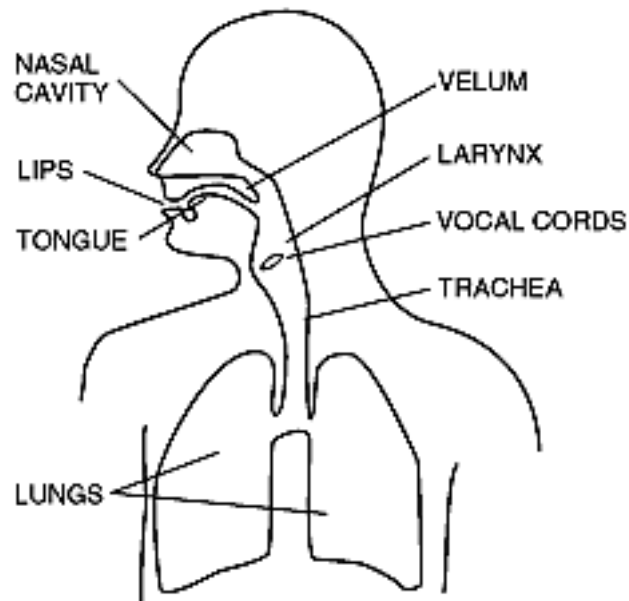
Pourquoi des personnes différentes ont des fréquences moyennes différentes? Comment peut une personne changer sa fréquence en temps réel en parlant avec de tons différents ou en chantant? Comment on peut entraîner sa voix pour être plus basse ou plus haute? Pour cela il faut comprendre le mécanisme physique pour créer la voix et ses caractéristiques.

## La physique de la voie humaine

Le mécanisme de fonctionnement de la voix humaine est celui d'une colonne d'air. Cette colonne d'air a la longueur entre les poumons et la bouche. Le mouvement de l'air commence par les poumons, se poursuit dans la trachée, puis est modulé vers le larynx et le pharynx au moyen des cordes vocales. À partir de là, les lois de la physique commencent à dire leur mot, la pression de l'air se transformant en ondes sonores. Les cycles de vibration génèrent des impulsions rapides qui provoquent l'apparition répétée du son. Le son est amplifié et modifié par la cavité buccale, le nez et la voix apparaît.

Tout comme un instrument musical, il y a besoin de trois composantes. Premièrement, d'une source d'air sortant sous pression. Ce rôle est joué par les poumons. Puis d'un oscillateur,

représenté par les cordes vocales. Et finalement, d'un résonateur. Ce rôle est joué par le larynx, le pharynx et la bouche. On peut changer notre voix en ajustant les paramètres physique de ce résonateur. Par exemple les sopranos obtiennent une voix plus haute en ouvrant la bouche plus largement [5].

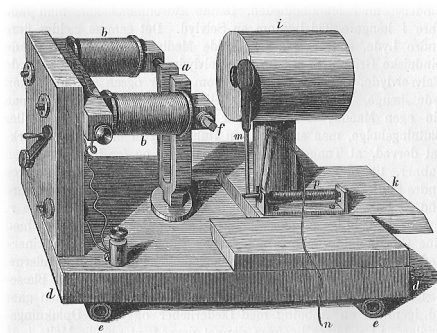


*Diagramme des organes humains contribuant à la formation de la voix [1].*

La partie essentielle est le résonateur. Est-ce qu'il y a un modèle physique assez simple qui explique la formation des fréquences différentes de la voix? Il se trouve que oui. C'est le résonateur de Helmholtz.

## Le résonateur de Helmholtz

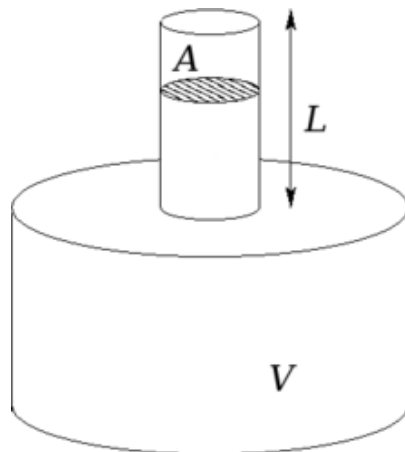
Le résonateur sonore a été développé par le physicien allemand Hermann von Helmholtz en 1863, comprenant de même une machine et le modèle mathématique derrière [6]. Il a identifié les fréquences variées d'une onde sinusoïdale. En combinant des différentes fréquences, on peut obtenir des sons ressemblant à la voix humaine.



*Hermann von Helmholtz (gauche) et sa machine de résonateur sonore (les deux à droite).*

Pour comprendre le modèle et la machine, c'est plus utile de considérer sa diagramme simplifiée. Le résonateur est formé d'une cavité fermée de volume  $V$ , connecté à l'extérieur avec un tube de longueur  $L$  et de section  $A$ . Les longueurs d'onde du son sont beaucoup plus grandes que les dimensions du résonateur. On suppose que l'air soit un gaz parfait et que la cavité soit

isolée thermiquement complètement pendant le passage de l'onde sonore, et que les pertes d'énergie telles que par le frottement de l'air sur les parois soient négligeables [7].



*Diagramme du résonateur de Helmholtz [7].*

Pour calculer la fréquence propre d'oscillation de ce résonateur, on suppose un déplacement infinitésimal de la colonne de l'air, on applique la loi de Laplace et le principe fondamental de la dynamique. On obtient un oscillateur linéaire à un degré de liberté qui a une vibration d'oscillation de fréquence  $f$

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V \cdot L}}$$

où  $c$  est la vitesse du son à travers le gas [7]. Tous les pas du calcul de cette formule sont présentés en [8]. On peut l'interpréter pour voir comment on peut augmenter la fréquence. Soit en augmentant la section d'ouverture  $A$ , c'est à dire en ouvrant plus la bouche, comme dans le cas de la soprana déjà mentionné. Soit en diminuant la longueur  $L$ , en apportant nos lèvres plus à l'intérieur. Soit en diminuant le volume  $V$  de la cavité par diminuant le volume de la bouche en bougeant les maxillaires.

En conclusion, Helmholtz nous a permis de comprendre comment les humains peuvent parler et chanter avec des fréquences qui change en temps réel. C'est pas surprenant alors que les études de Helmholtz ont influencé la science musicale du vingtième siècle.

## Bibliographie

- [1] "The physics of voice" at [Weebly.com](http://Weebly.com).
- [2] "Sex differences in hearing. Implications for best practices in classroom.", [Advances in Gender and Education, 2 \(2010\), 13-21](#).
- [3] "Have women's voices lowered across time? A cross sectional study of Australian women's voices", [Journal of Voice, Volume 12, Issue 2, 1998, 208-213](#).
- [4] "The reasons why women's voices are deeper today", [BBC story](#).
- [5] "The Acoustics of the Singing Voice", [Scientific American, 1977 Mar](#), et la version complète de l'article à l'université [McGill University](#).
- [6] [Wikipedia](#) sur Hermann von Helmholtz et sur ses travaux en acoustique.
- [7] [Wikipedia](#) sur la résonance de Helmholtz.
- [8] "Approach Model of Speech Production Using Helmholtz Resonator and Wave Equation", L Rivero, [proceedings at the 2010 Fourth UKSim European Symposium on Computer Modelling and Simulation](#)