

Acoustique et physiologie humaine

I La voix : un émetteur sonore particulier

Doc 1 La voix humaine, instrument de musique par excellence

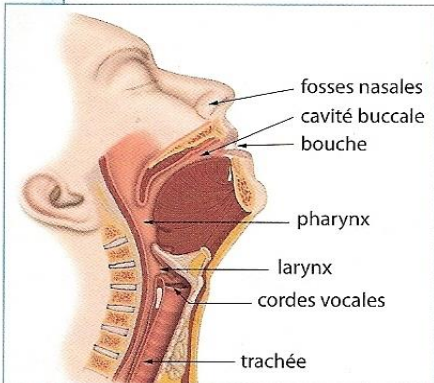


Fig. 1 L'appareil vocal humain.

La formation d'un son vocal (Fig. 1) repose, comme pour tout instrument de musique (Fig. 2), sur le mécanisme suivant : une source sonore, mise en vibration, crée des ondes mécaniques périodiques qui se propagent dans l'air. Ces ondes sonores naissantes, simples, détériorées, et encore inaudibles, traversent des cavités résonantes. Certaines fréquences sont atténuées, alors que d'autres sont amplifiées.

Le son se complexifie alors plus ou moins selon les dimensions des cavités. Il devient constitué d'une fréquence fondamentale, associée à des fréquences harmoniques qui définissent le timbre du son. Ces sons produits, audibles, sont enfin transmis à l'air ambiant par un émetteur, la bouche.

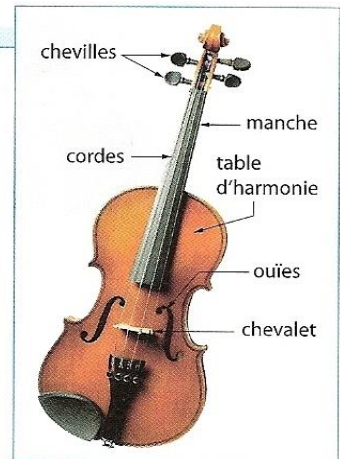


Fig. 2 Principaux éléments produisant du son dans un violon.

Doc 2 Anatomie des cordes vocales

La voix humaine peut produire des sons de différentes hauteurs. C'est en modifiant la tension, et surtout l'épaisseur des cordes vocales (Fig. 3), que l'on change leur fréquence de vibration. Contrôlées par des muscles du larynx, les cordes vocales se tendent ou se relâchent, ce qui a pour effet de modifier la fréquence fondamentale (perçue comme la hauteur) des sons émis.

Les dimensions des cordes vocales varient d'un individu à l'autre (de 17 à 25 mm de long chez un homme, contre 12,5 à 17,5 mm chez la femme par exemple). Plus elles sont courtes et fines, plus elles peuvent vibrer rapidement lors du passage de l'air expiré et produire des sons aigus. Ce phénomène est comparable à celui qui est observé avec un ballon de baudruche gonflé, dont les bords serrés laissent lentement échapper l'air. En tirant plus ou moins sur ceux-ci, on modifie la longueur et la finesse de l'ouverture, afin de faire varier la fréquence du son produit.

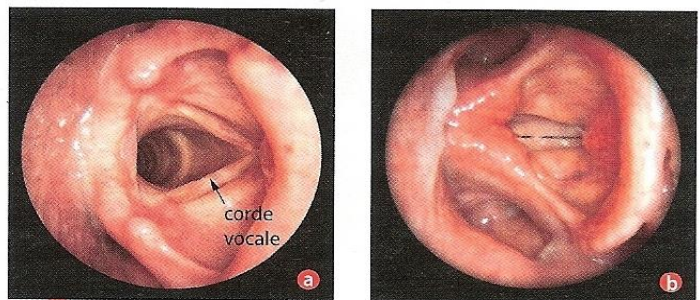


Fig. 3 Cordes vocales écartées (a) ou accolées (b).

Doc 3 La voix, une onde de pression dans l'air

C'est en faisant sortir l'air des poumons avec plus ou moins de pression qu'il est possible de modifier l'intensité de la voix. En effet, lors de la formation de la voix, les poumons, tels une soufflerie, envoient un flux d'air qui remonte le long de la trachée (canal qui relie les poumons à la bouche) et atteint les cordes vocales. Ces dernières, accolées dans un premier temps, s'écartent l'une de l'autre : c'est le début d'une première oscillation, qui se traduit par une augmentation de la pression de la

colonne d'air située au-dessus du larynx (Fig. 4. a). Lorsque les cordes vocales, élastiques, se rapprochent, le flux d'air est alors progressivement interrompu, ce qui provoque, à l'inverse, une diminution de la pression (une détente) de la colonne d'air (Fig. 4. b).

Ces changements de pression de l'air (ces successions de compressions et détentes) sont transmis de proche en proche jusqu'à la bouche, émetteur de la voix.

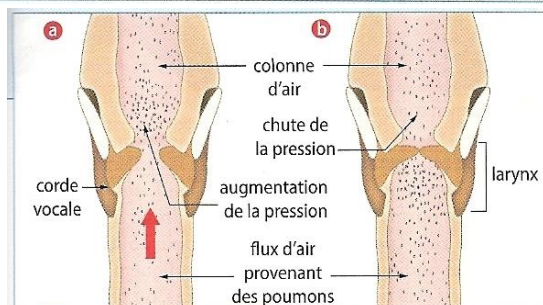


Fig. 4 Variation de pression (a) à l'ouverture ; (b) à la fermeture des cordes vocales.

Doc 4 Enregistrements et spectres de la voix

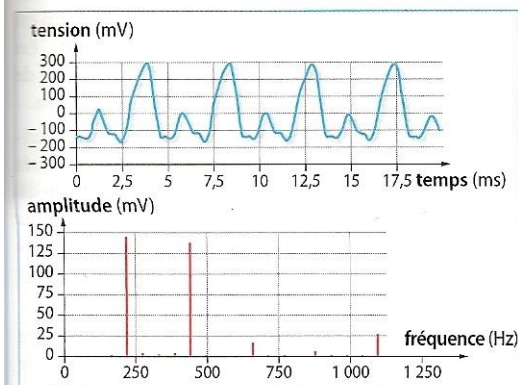


Fig. 5 Enregistrement et analyse des fréquences présentes dans le son « o » d'une voix masculine.

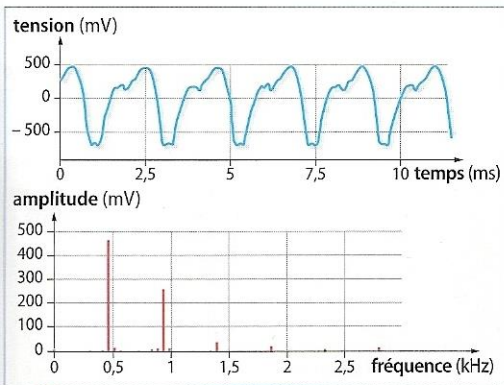


Fig. 6 Enregistrement et analyse des fréquences présentes dans le son « o » d'une voix féminine.

Etude de documents :

A partir des documents qui vous sont proposés et de vos connaissances personnelles en acoustique, répondre aux questions suivantes :

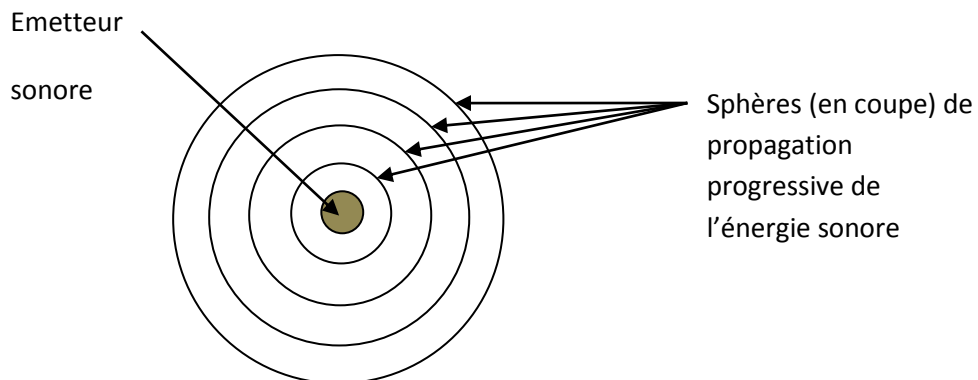
- 1) Pourquoi peut-on affirmer que la voix, au sens physique du terme, est un son ?
- 2) Quels organes rentrent en jeu et sur quelles caractéristiques agissent-ils quand une personne modifie sa voix ?
- 2) Comment expliquer que chaque individu, même s'il peut la modifier, a une voix qui lui est propre ?

II L'oreille, un récepteur sonore particulier fragile

Document 1 : puissance, intensité sonore

Un son correspond à la propagation d'une énergie provenant d'un émetteur. De l'énergie est donc émise à la sortie d'un émetteur sonore. On lui associe une puissance sonore en W.

De part la propagation de l'onde sonore émise, cette énergie se propage alors dans l'air suivant des sphères de plus en plus grandes si la vitesse du son est la même en toute direction, concentriques, le centre de chacune correspondant à l'émetteur :



L'intensité sonore en un point quelconque de l'espace, du son émis par l'émetteur est notée I et s'exprime en $W.m^{-2}$.

Elle est proportionnelle à l'inverse du carré de la distance à la source. Autrement dit, si on prend deux points quelconque A et A' distants de d et d' de l'émetteur alors on a la relation suivante entre l'intensité en A et l'intensité en A' :

$$\frac{I}{I'} = \frac{d'^2}{d^2}$$

C'est-à-dire que si la distance est 5 fois plus grande par rapport à l'émetteur, alors l'intensité sonore est 25 fois plus faible.

On définit l'intensité sonore de référence correspondant en moyenne au seuil d'audibilité pour l'oreille humaine et égale par convention à $I_0 = 10^{-12} W.m^{-2}$.

J'analyse un document : en réalité tout doit me paraître logique :

Première phrase : Dès que je rencontre une grandeur connue, je me rappelle son unité dans le SI, ici l'unité d'une énergie.

Troisième phrase : je me rappelle à quoi correspond 1 W. Je fais une phrase expliquant ce que signifie par exemple que la puissance d'un haut-parleur vaut 40 W en utilisant les termes « émettre », « énergie », « durée » « joule » et « seconde » forcément.

Deuxième paragraphe et figure : j'analyse le document : je sais expliquer pourquoi les sphères sont de plus en plus grandes. Je comprends pourquoi ce sont des sphères si la vitesse du son est la même dans toutes les directions et je fais un nouveau dessin dans le cas par exemple où la vitesse dans la direction verticale est plus faible que la vitesse dans la direction horizontale.

Troisième paragraphe : on définit une nouvelle grandeur avec une unité donc SURTOUT je visualise ce qu'elle veut représenter : je fais une phrase en français expliquant ce que signifie par exemple une intensité sonore de 2 W.m^{-2} en utilisant déjà tous les termes déjà introduits pour la puissance et des nouveaux termes correspondant au « m^{-2} » (c'est-à-dire le « par mètre carré »). J'essaie alors de comprendre pourquoi cette intensité est proportionnelle à l'inverse du carré de la distance au récepteur : pour cela j'imagine une certaine énergie émise E en une seconde pour faire simple et je me mets à la place de cette énergie : je sens que je me propage dans l'air suivant une sphère qui grossit, qui grossit ; une sphère de rayon d a une surface de $4\pi d^2$ et même si je ne me rappelle pas cette formule, je sais obligatoirement qu'il y a un d^2 qui intervient pour que cela corresponde à une surface. J'en déduis alors I par la formule Je sens que c'est normal que I décroît ainsi plus d augmente car la puissance totale est mais se répartit sur une sphère de plus en plus grande. J'en déduis alors correctement la formule proposée entre I et I' et je vérifie la phrase suivante en prenant un exemple concret pour d et pour d' si je n'arrive pas à le faire dans le cas général.

Dernière phrase : je la comprends, notamment le terme « seuil » et le terme « convention » en utilisant des mots simples pour la reformuler.

Document 2 : niveau sonore (explicitement au programme du tronc commun)

La loi de Fechner indique que « la sensation, liée au niveau sonore (L) perçu, varie comme le logarithme décimal de l'excitation du tympan liée à l'intensité sonore (I) reçue », c'est-à-dire que si l'intensité sonore est multipliée par 10, je perçois un son qui aura augmenté de 10 dB mais si elle est multipliée par 100, je perçois un son qui n'a pas augmenté de 100 dB mais seulement de 20 dB. Et si l'intensité est multipliée par 1000, je ne perçois un son qui a augmenté que de 30 dB et non de 1000. Si l'intensité est multipliée par 10^n alors je perçois un son qui augmente de $10 \cdot n$ décibels et non de 10^n décibels.

Le niveau sonore L , pour une intensité sonore I , est ainsi défini mathématiquement :

$$L = 10 * \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Avec I En W.m^{-2} et I_0 valant $10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$ (référence correspondant au seuil audible moyen).

L est alors en décibel (dB)

J'analyse le document proposé. La loi de Fechner peut paraître obscure dans sa première partie mais plus simple avec son explication. Je fais très attention aux termes employés dans les exemples cités : si l'intensité est **multipliée** par ... alors je perçois qqch qui n'est pas multiplié mais qui augmente de ... donc une MULTIPLICATION par 10 de l'intensité correspond à une ADDITION de 10 du niveau sonore perçu.

Je le vérifie sur ma chaîne hifi : si la puissance de ma chaîne est multipliée par 1000, je n'entends pas du tout 1000 fois plus fort mais on ajoute 30 dB en réalité. De même, lorsque j'entends 10 chanteurs, je ne perçois pas un niveau sonore 10 fois plus grand mais seulement qui a augmenté de 10 dB et si je veux encore augmenter ce niveau de 10 dB, je dois passer à ??? chanteurs.

Je fais des calculs alors avec la formule donnée en utilisant ma calculatrice et la touche log avec des exemples simples d'abord : taper $\log(1)$, $\log(10)$, $\log(1000)$, $\log(10000)$... $\log(10^n)$. Puis déterminer, en ayant compris le mécanisme, de tête (sans calculatrice) le niveau sonore correspondant à une puissance I valant I_0 , puis $10 I_0$ puis $100 I_0$ puis $10^8 I_0$ etc.

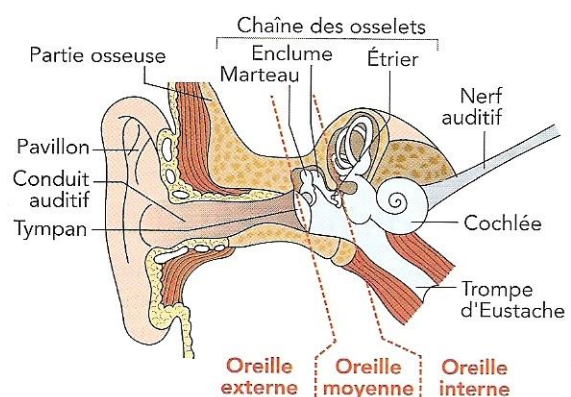
Je comprends, d'après la formule, d'où vient le préfixe « déci » dans *décibel*...

Document 3 : l'oreille humaine

L'oreille comporte trois parties.

- L'**oreille externe** est la seule partie en communication directe avec l'extérieur. Elle est composée d'un pavillon et d'un conduit auditif. C'est une simple structure de transmission des sons vers le tympan.
- L'**oreille moyenne** tient le rôle de protection et de transmission mécanique. Les vibrations du tympan sont transmises au marteau, à l'enclume et à l'étrier.
- L'**oreille interne** est la partie la plus fragile de l'oreille. Elle est constituée de quelques milliers de cellules ciliées situées dans la cochlée qui convertissent les vibrations mécaniques en signaux électriques. C'est « notre capital auditif ».

D'après le site www.ecoute-ton-oreille.com géré par l'INPES.



Document 4 : les dangers du bruit

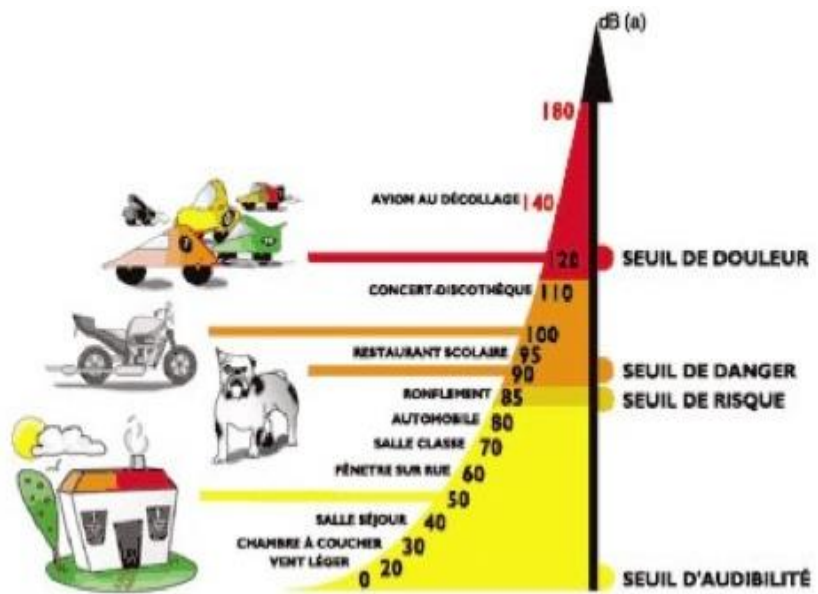
Les sons deviennent nocifs lorsque leur intensité dépasse les possibilités de réception de l'oreille.

Le niveau d'intensité sonore est exprimé en décibel (dB). L'échelle va de 0 à 120 dB, mais certaines sources (avions, canons, fusées) émettent des sons d'un niveau supérieur. La réglementation limite à 100 dB le niveau de sortie des baladeurs et à 105 dB celui dans les lieux musicaux. La limite de nocivité est située à 85-90 dB.

Après exposition prolongée à un niveau proche de 100 dB, par exemple, après une soirée en discothèque, on constate divers états auditifs que l'on peut classer par gravité croissante :

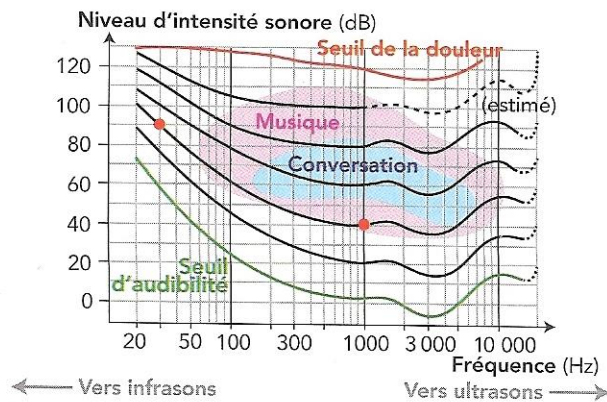
- aucun phénomène auditif particulier, c'est le cas le plus fréquent, mais à coup sûr, quelques cellules ont été fragilisées ;
- phénomènes temporaires tels que des bourdonnements ou des sifflements (acouphènes) ;
- phénomènes de type acouphènes persistants et irréversibles, baisse sensible de l'audition.

D'après la brochure « Nos oreilles on y tient », Association Journée Nationale de l'Audition.



Document 5 : diagramme de Fletcher, sensibilité de l'oreille

L'oreille perçoit convenablement les sons dont le niveau d'intensité sonore est compris entre le seuil d'audibilité et le seuil de douleur. Sa sensibilité varie en fonction de la fréquence. Cela peut être représenté par une série de courbes dites d'égale sensation auditive. Ces courbes montrent, par exemple, qu'un son de 1000 Hz dont le niveau d'intensité sonore est de 40 dB donne la même sensation d'intensité qu'un son de 30 Hz de 90 dB (points rouges).



Par ailleurs, la sensibilité de l'oreille diminue avec l'âge, ce qui conduit à des pertes auditives.

La référence pour la sensibilité est faite à 1000 Hz : un son de 1000 Hz a le même niveau sonore et la même sensibilité.

Je comprends comment est fait ce diagramme : ce qui est en abscisse, en ordonnée. Et je comprends quel(s) nouveau(x) paramètre(s) est(sont) pris en compte ici à savoir ?? Je note les mots importants nouveaux du texte : « courbe d'égale sensation auditive » et je les comprends en prenant un autre exemple que celui fourni.

Problème posé :

En discothèque, le seuil maximal de niveau sonore est respecté. En considérant que ce seuil de niveau sonore est respecté pour toutes les fréquences, quelles sont celles qui vont être davantage perçues que les autres ? Quel problème cela engendre-t-il ?

En réalité, ce niveau sonore est un niveau moyen. Les DJ ont tendance à abaisser d'une certaine valeur l'intensité de certaines fréquences pour augmenter de la même valeur au contraire certaines autres de manière à ce que la sensation de bruit chez les gens soit plus grande *globalement* sans pour autant être hors la loi. Il en est de même pour les publicités à la télévision : on les perçoit plus fortes afin de capter notre attention et cependant leur niveau sonore, en moyenne, n'est pas plus élevé qu'une émission sur un plateau, les publicitaires n'étant (pour l'instant) pas inquiétés. D'après le diagramme de Fletcher, quelles sont les fréquences qui sont amplifiées et quelles sont celles alors qui sont abaissées afin de parvenir aux fins malhonnêtes des DJ ?