

Audition humaine

Comparaison du fonctionnement de l'oreille et de l'œil

Publié le 07.09.05 Par [Gabrielle Bonnet](#), [Gilles Camus](#)

Cet article propose de comparer les caractéristiques physiques de la vision avec celles de l'ouïe. Après un rappel de l'anatomie de l'oreille, les performances de celle-ci sont comparées à celles de l'œil, du point de vue de la résolution (perception des fréquences) et de la localisation de la source stimulante (relief sonore). L'article aborde également quelques problèmes d'audition.

1. Introduction

Le son et la lumière ont été comparés dans un article du site [CultureSciences-Physique](#) « [Rayons sonores et ondes de lumière ?](#) ».

Toutefois, il est impossible de mettre en parallèle le son et la lumière sans se préoccuper, non seulement de la nature physique de ces deux types d'ondes, mais aussi du fonctionnement des organes qui nous permettent de les percevoir. L'étude de l'œil et de ses défauts a été faite dans l'article « [Les défauts de la vision](#) » et quelques expériences simples proposées dans l'article « [Quelques expériences pour mettre en évidence les propriétés de l'œil](#) », qui reprenait en partie une série d'expériences proposées par Alfred Cortel. Le propos, ici, est de constituer le pendant de ces articles sur le fonctionnement de l'œil, en proposant un résumé succinct du fonctionnement de l'organe de l'ouïe.

L'ouïe est le sens, comme le toucher ou l'odorat, et l'audition la perception des sons obtenue grâce à ce sens. Une personne mal entendante possède le sens de l'ouïe, comme tout un chacun, mais a une mauvaise audition.

2. Anatomie et fonctionnement de l'oreille

2.1. Anatomie de l'oreille

La figure 1 présente quelques éléments constitutifs de l'anatomie de l'oreille et permet d'aborder son fonctionnement. L'oreille externe est constituée du pavillon et du conduit auditif. L'oreille moyenne comprend le tympan, les osselets (marteau, enclume et étrier), ainsi que la fenêtre ovale et la fenêtre ronde. L'oreille moyenne communique avec le pharynx par la trompe d'Eustache. L'oreille interne, enfin, contient la cochlée ainsi que les canaux semi-circulaires. Le nerf auditif transmet l'information sonore au cerveau.

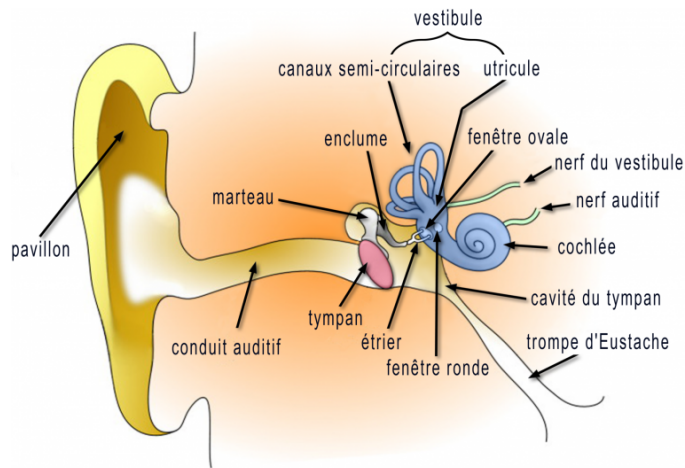


Schéma de l'oreille humaine

La fenêtre ovale limite la base de la rampe vestibulaire et reçoit l'étrier. La fenêtre ronde limite la base de la rampe tympanique et sert d'échappement de pression.

Auteur(s)/Autrice(s) : Dan Pickard Licence :

Domaine public Source : [Wikimedia](#)

Les canaux semi-circulaires ne seront pas abordés dans cet article, car ils sont impliqués dans l'équilibre et non l'ouïe.

2.2. Fonctionnement de l'oreille

Les ondes sonores arrivent sur le tympan qu'elles font vibrer. Ces vibrations sont transmises, via les osselets, à la fenêtre ovale. Après la fenêtre ovale, les ondes sont transmises à l'endolymphe et à la membrane basilaire de la cochlée, sur laquelle se trouvent des cellules ciliées. Ce sont des cellules sensorielles (il y a des cellules externes et des cellules internes correspondant au total à environ 35 000 fibres nerveuses) qui ont des courbes de sensibilité différentes aux différentes fréquences : les cellules les plus proches de la base de la cochlée ont un pic de sensibilité pour les sons les plus aigus, tandis que les cellules les plus proches de son extrémité ont un pic de sensibilité pour les sons les plus graves, c'est la tonotopie cochléaire. Les sons perçus par l'oreille humaine varient entre 20 Hz et 20 kHz environ.

Les **cellules ciliées internes** sont les cellules sensorielles de la cochlée. Elles sont disposées en une seule rangée du côté interne du tunnel de Corti et connectées aux neurones dont les axones constituent le nerf auditif. Ce sont elles qui assurent la transduction du signal vibratoire (mécanique) en un signal électrique (dépolariation). La cochlée humaine possède entre 3000 et 3500 cellules ciliées internes.

Ces **cellules ciliées externes** (disposées en trois rangées du côté externe du tunnel de Corti) possèdent, grâce à leur **électromotilité**, un double mécanisme de transduction, qui améliore notablement la sensibilité de la cochlée et sa capacité à coder de manière différentielle des fréquences très proches.

Les osselets ne transmettent pas seulement les vibrations à l'oreille interne, ils ont aussi un rôle d'**adaptation d'impédance** (tout comme le gel sur la peau lors d'une échographie).

L'impédance acoustique est la résistance d'un milieu au passage d'un son (impédance de l'air = $430 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ et impédance de l'eau = $1,5.10^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$).

3. Œil et oreille : une comparaison

L'oreille fonctionne-t-elle de manière analogue à l'œil ? Quelles sont les différences majeures entre ces deux organes ?

Nous allons souligner ici seulement deux différences majeures entre l'œil et l'oreille : la perception des fréquences et la localisation spatiale.

3.1. La perception des fréquences

L'œil, pour percevoir les couleurs (c'est-à-dire les fréquences des ondes qui lui parviennent) dispose de cellules spécifiques à la vision colorée : les cônes. Ceux-ci sont de trois sortes (pour en savoir plus, voir [La trivariance visuelle chez l'Homme](#) qui donne un aperçu rapide de la question). De ce fait, l'information sur le spectre d'une lumière polychromatique va être traduite, par les cônes, par trois paramètres seulement. C'est pour cela que deux lumières différentes (c'est-à-dire de spectres différents) peuvent nous sembler avoir la même couleur, si l'impression qu'elles font sur les cônes est identique. Nous percevons l'essentiel des lumières polychromatiques comme des lumières monochromatiques d'une certaine fréquence, d'intensité variable, et plus ou moins « lavées de blanc ».

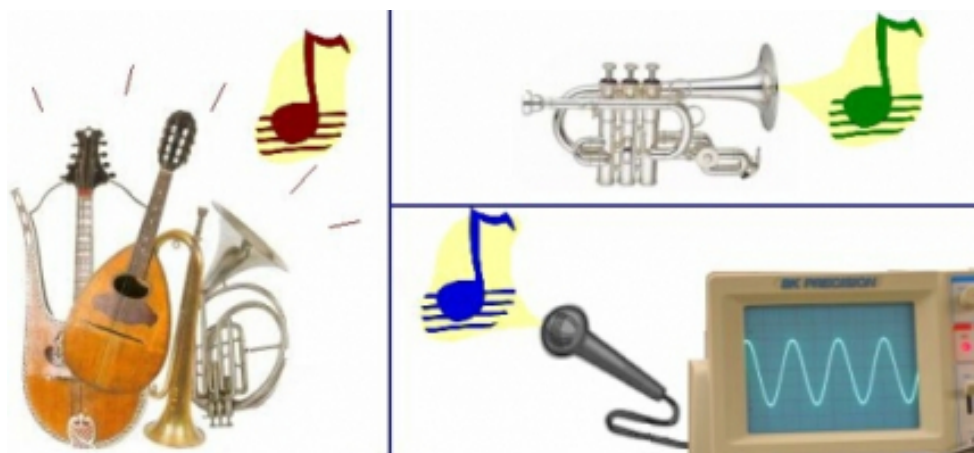
Les lois d'addition des couleurs sont l'illustration de ces limitations de l'œil : la somme de deux lumières de couleurs différentes est perçue comme une troisième couleur : on n'arrive pas à percevoir les

fréquences composant le mélange, mais seulement une fréquence dont l'effet est équivalent pour nos yeux.

A contrario, l'oreille dispose de milliers de cellules ciliées de sensibilités différentes. Ces nombreuses cellules permettent une bien plus grande discrimination en fréquence que les trois sortes de cônes de l'œil.

Ainsi, l'oreille ne perçoit pas seulement une « résultante » de l'ensemble des fréquences composant un son mais est capable d'entendre le spectre d'un mélange de plusieurs fréquences sonores. On est ainsi capable de distinguer un son « pur » (composé d'une seule fréquence) d'un son composé de nombreuses fréquences. C'est ainsi que nous reconnaissons des instruments différents jouant la même note, à leur timbre (qui correspond à la richesse spectrale du son émis par l'instrument), ou que nous savons distinguer un accord d'une note isolée.

Les orchestres n'auraient plus grand sens si un mélange de notes était perçu comme une note unique, de la même façon qu'un mélange de couleurs différentes est perçu comme une unique couleur résultant de « l'addition » de ces couleurs.



Spectre sonore

Auteur(s)/Autrice(s) : Gabrielle Bonnet, Gilles Camus Licence : [Pas de licence spécifique \(droits par défaut\)](#)

L'oreille sait faire la différence entre un orchestre (à gauche), un instrument isolé (en haut à droite), ou une fréquence unique (produite par exemple de façon synthétique, en bas à droite) même lorsque la note jouée dans les trois cas est la même.

Contrairement à l'œil qui ne voit qu'une « résultante » du spectre des fréquences qui lui parvient (la couleur), l'oreille sait donc faire la différence entre divers

mélanges de fréquences sonores, ainsi qu'entre un son composé de plusieurs fréquences et un son « pur ».



Spectre de lumière et résultante visuelle

Auteur(s)/Autrice(s) : Gabrielle Bonnet, Gilles Camus Licence : [Pas de licence spécifique \(droits par défaut\)](#)

Un mélange, au même point, de fréquences lumineuses différentes est perçu comme une teinte unique: ici l'exemple du spectre d'une lampe à vapeur de mercure (à gauche de l'image) et de la teinte résultante que nous percevons (à droite).

Si l'oreille semble supérieure à l'œil lorsqu'on considère son aptitude à discerner des fréquences différentes, elle lui est par contre très inférieure en ce qui concerne la perception de l'espace.

3.2. Localisation spatiale : l'œil beaucoup plus performant

L'œil possède une lentille, le cristallin, qui permet de faire l'image de ce qui est regardé sur la rétine. Si celle-ci ne possède que quatre types de capteurs (en comptant les bâtonnets et les trois types de cônes), elle en possède, par contre, un très grand nombre, disposés sur toute la surface de la rétine et permettant d'obtenir une information spatiale sur les sources lumineuses (rétinotopie).

Ainsi, on peut apprécier un paysage, une peinture, etc. L'œil peut discriminer des détails correspondant à un angle de $1'$ ou 3×10^{-4} rad, c'est-à-dire qu'il est capable de discerner un déplacement de 1 mm environ à 4 m de distance (ou 1 cm à 40 m) !

L'oreille, bien qu'elle possède un pavillon, ne possède pas de lentille à proprement parler, et ne possède pas non plus de capteurs détectant, comme les capteurs de la rétine, l'origine spatiale du son entendu. Une oreille unique semble donc a priori « aveugle » à la position dans l'espace (on verra un peu plus loin comment nuancer cette position et comment la présence de deux oreilles aide à la perception du relief sonore, bien que cette perception reste très inférieure aux performances obtenues avec nos yeux), tandis qu'elle est très bonne à dissocier les fréquences. De son côté, l'œil est très efficace en termes de détection spatiale (deux yeux permettant en outre une détection en trois dimensions) et plutôt peu efficace en termes de détection des fréquences, la vision des couleurs ne permettant pas de percevoir

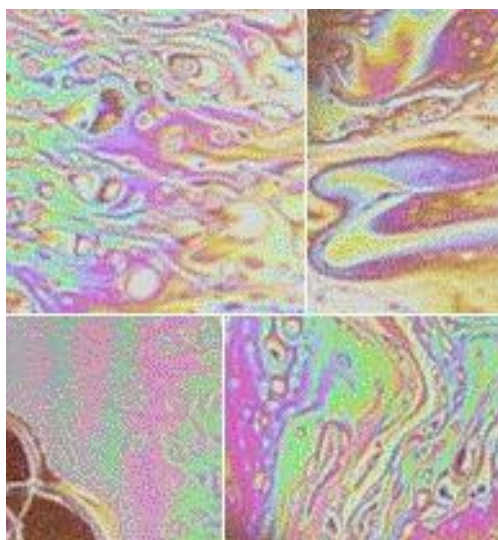
toute la richesse spectrale d'une lumière.

Si l'oreille possédait une résolution spatiale identique à celle de l'œil, alors on pourrait faire des « peintures sonores », dans lesquelles la disposition spatiale des instruments serait d'une précision extrême (le compositeur ferait attention à la position des instruments à 5 centimètres près !).

En effet, on peut encore bien distinguer une photographie de visage à 1,5 m de distance, et si les positions du nez et de la bouche, par exemple, étaient inversées, ça se verrait aussitôt ! En prenant une distance de 5 mm entre le nez et la bouche sur la photo, ceci correspond à un angle de 2×10^{-2} rad. Cet exemple illustre les capacités de résolution de l'œil.

L'équivalent, en terme sonore, de ce déplacement du nez dans la photo dont nous venons de parler, correspondrait à un déplacement de 5 cm d'un instrument de musique lors d'un concert, pour un observateur moyen placé à 15 mètres du musicien. Ainsi, ce déplacement de 5 centimètres devrait nous être tout aussi évident, tout aussi choquant, le cas échéant, que l'échange des positions de la bouche et du nez sur un portrait, si l'oreille était aussi performante que l'œil en termes de résolution spatiale !

Si, de façon similaire, on imagine un œil aussi apte à discriminer les fréquences que l'oreille, on pourrait faire des « concerts de lampes » dans lesquels on apprécierait l'harmonie spectrale constituée, par exemple, par l'association d'une lampe à incandescence d'amplitude variable avec, en contrepoint, une lampe à hélium basse pression ! Le « timbre » de différentes lampes serait différent : loin d'être restreinte à la perception d'une couleur « résultante », notre vision nous permettrait de ressentir toute la richesse du spectre lumineux de différentes sources.



Irisations à la surface de bulles de savon

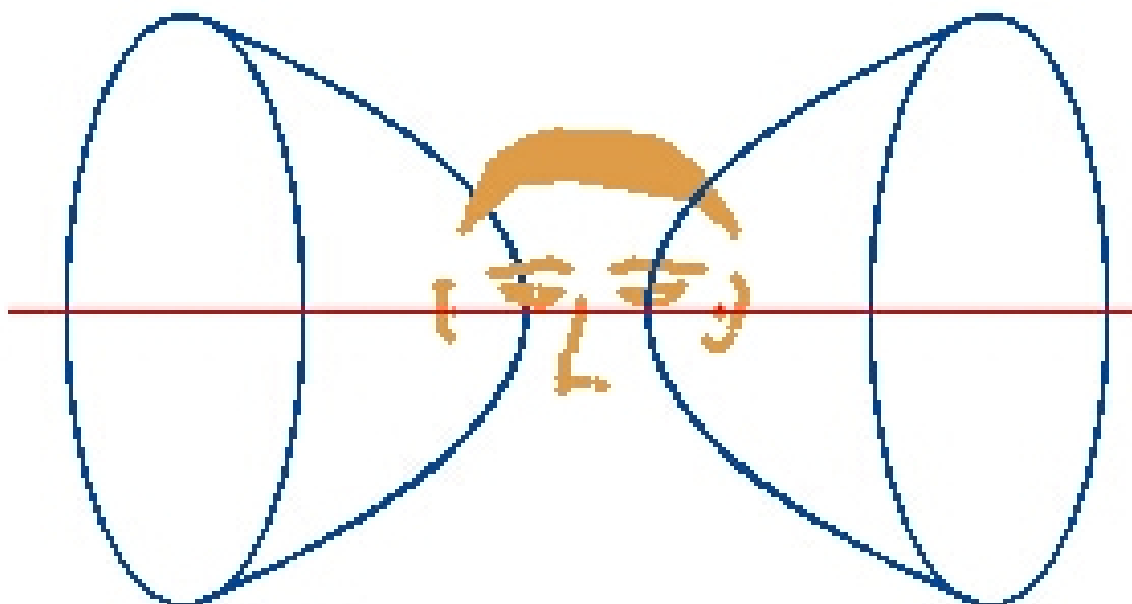
Auteur(s)/Autrice(s) : Gabrielle Bonnet, Gilles Camus Licence : [Pas de licence spécifique](#)
(droits par défaut)

Distinguer les irisations des bulles de savon n'est possible que parce que l'œil a une très grande résolution spatiale, bien supérieure à celle de l'ouïe, et reconnaître une personne à son timbre de voix n'est possible que parce que la perception des fréquences par l'ouïe est bien supérieure à celle de l'œil...

4. La perception du relief sonore

En dépit de l'absence, au sein de l'oreille, d'un équivalent de ce que représente la rétine pour l'œil en termes de détection spatiale, on arrive à percevoir avec une certaine précision l'origine des sources sonores. Comment se fait cette localisation sonore ?

En premier lieu, tout comme la présence de deux yeux permet d'ajouter le relief, donc une troisième dimension, à la vision bi-dimensionnelle fournie par un œil unique, la présence de deux oreilles permet une première estimation de l'origine du son. En effet, les sons n'arrivent pas aux deux oreilles en même temps, et cette différence est suffisamment élevée pour être perceptible (la vitesse du son étant bien plus faible que celle de la lumière). La distance entre les deux oreilles est d'une vingtaine de centimètres et l'intervalle de temps séparant l'arrivée du son aux deux oreilles peut ainsi atteindre 0,6 ms environ.



Géométrie de la localisation spatiale d'un son

Auteur(s)/Autrice(s) : Gabrielle Bonnet, Gilles Camus Licence : [Pas de licence spécifique \(droits par défaut\)](#)

La donnée de l'intervalle de temps séparant l'arrivée du son à chacune des deux oreilles (aussi appelé intervalle de temps interaural) permet de restreindre l'origine possible du son à un hyperboloïde de révolution (en bleu) dont l'axe (en rouge sur le dessin) est la droite reliant les deux oreilles.

Les oreilles permettent donc de localiser un son sur la surface telle que la différence de trajet entre un point de cette surface et chacune des deux oreilles soit constant. Mathématiquement parlant, cette relation définit un hyperboloïde. En fait, le cerveau possède une information additionnelle : l'oreille à laquelle le son est arrivé en premier, la source du son, est donc restreinte à un demi-hyperboloïde. Lorsque la source du son est suffisamment loin des oreilles, ce demi-hyperboloïde peut être assimilé à un cône de sommet « la tête » et dont l'axe est la droite joignant les deux oreilles. Ainsi, la différence de temps interaural permet de déterminer l'angle que fait la source sonore avec l'axe des oreilles.

Deux autres éléments complètent la perception de la différence de temps interaural (ou y suppléent, lorsque l'information donnée par cette différence est trop peu précise) : l'atténuation, surtout pour les fréquences élevées, du son lorsqu'il arrive à l'oreille la plus éloignée de la source par rapport à son intensité au niveau de l'oreille la plus proche (pour les fréquences les plus basses, la diffraction du son autour de la tête réduit cette atténuation), ainsi que le déphasage de l'onde entre les deux oreilles. Ces trois informations (différence de temps interaural, déphasage et atténuation) contribuent à identifier l'angle que fait la source sonore avec l'axe des oreilles.

Les effets de diffraction se font sentir pour des longueurs de l'ordre de la longueur d'onde, ou plus petites. La longueur d'onde d'une onde sonore est $\lambda = c / \nu$ où ν est la fréquence de l'onde soit, pour des fréquences audibles comprises entre 20 Hz et 20 kHz, $1,7 \text{ cm} < \lambda < 17 \text{ m}$... Le diamètre de la tête étant d'une vingtaine de centimètres, on comprend que les effets de diffraction ne soient pas négligeables, surtout pour les basses fréquences...

Les animaux ont souvent des oreilles aux pavillons mobiles. Si l'homme ne peut en faire autant, il peut incliner la tête dans la direction d'où vient un son : ce mouvement permet de faire une deuxième estimation de l'origine du son, et ainsi d'affiner la perception. On peut alors déterminer plus précisément la direction d'où provient le son, mais cette détermination ne permet pas encore, cependant, de savoir exactement la distance à laquelle se trouve la source sonore.

Pour une localisation spatiale plus fine d'un son, d'autres facteurs encore interviennent.

La reconnaissance d'un son habituel permet de préciser en partie sa localisation spatiale (la force du bruit d'un moteur de voiture donne ainsi des indications sur sa distance).

D'autre part, l'audition humaine fait intervenir des phénomènes assez complexes : déformations différentes des fréquences, suivant leur direction, par le pavillon des oreilles, ou intervention de la conduction osseuse (en plus des deux oreilles) dans l'audition, autant d'éléments qui peuvent contribuer

à la localisation des sons.

De fait, l'oreille humaine (avec des variations selon les individus et leur degré d'entraînement) réussit à localiser l'origine des sons avec une précision satisfaisante pour la vie quotidienne mais qui est loin d'égaliser celle de l'œil. En fait, la meilleure résolution que l'on arrive à obtenir est de l'ordre d'une dizaine de degrés, soit 0,2 rad environ, à comparer avec la résolution de 3×10^{-4} rad que l'on obtient avec l'œil... L'œil est au moins 600 fois plus performant dans ce domaine !

5. Les problèmes d'audition

5.1. Différents handicaps auditifs

Les handicaps auditifs peuvent provenir d'un dysfonctionnement des différents éléments contribuant à l'audition.

On distingue :

- Les surdités de transmission, touchant l'oreille externe ou l'oreille moyenne, qui empêchent le son d'être transmis à l'oreille interne
- Les surdités de perception qui touchent l'oreille interne, la cochlée ou le nerf auditif
- Les surdités centrales, enfin, qui correspondent à des lésions des centres nerveux de l'audition dans le cerveau

Les origines de ces **surdités** sont variables : bouchons de cérumen (il s'agit alors de quelque chose de tout à fait bénin), lésions du tympan (suite à une otite, par exemple), atteinte des osselets (via une ostospongiose), effet de l'âge (presbyacousie), du bruit...

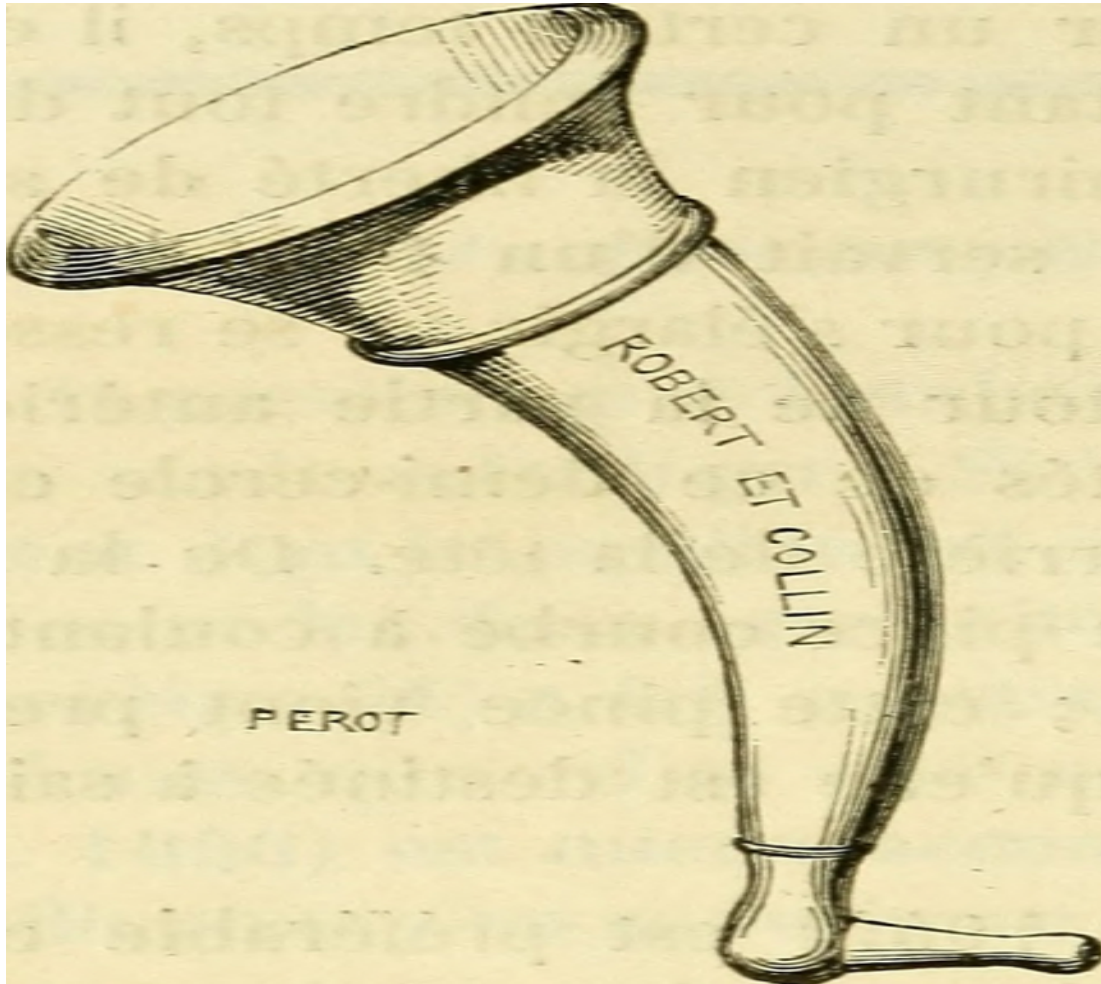
Un audiogramme permet de préciser la perte auditive en fonction des fréquences. Les surdités dues à l'âge touchent surtout les hautes fréquences, celles-ci étant perçues par les cellules ciliées les plus externes qui sont les premières touchées. Les surdités dues au bruit, au contraire, touchent surtout les fréquences situées entre 3 et 4 kHz.

Ainsi, une personne malentendante souffrant de presbyacousie peut très bien entendre la voix de son interlocuteur mais ne plus comprendre, car les fréquences aiguës ne sont plus perceptibles alors qu'elle entend encore bien « dans les graves ».

5.2. Les appareils auditifs

L'appareil auditif le plus simple aurait simplement une fonction d'amplification des sons :

- le cornet acoustique ancien,
- ou un appareil plus récent comportant un microphone, un amplificateur et un écouteur, réaliseraient tous deux cette forme primitive d'appareil auditif.



Dessin d'un cornet acoustique

Auteur(s)/Atrice(s) : Gaujot, Spillmann Licence : [Domaine public](#) Source : [Flickr](#)

Si l'énergie acoustique arrivant à l'entrée du cornet se retrouve intégralement à la sortie, l'intensité du son est multipliée, entre l'entrée et la sortie, par le rapport des surfaces des deux extrémités du cornet.

Ceci correspond à une amplification de 20 dB environ pour un cornet traditionnel, dans lequel le rapport des rayons aux deux extrémités du cornet serait de l'ordre de 10. Le gain en décibels est donné par la formule:

$$\text{gain(dB)} = 10 \text{ Log}(I_{\text{sortie}} / I_{\text{entrée}}) = 10 \text{ Log}(\text{Surface}_{\text{entrée}} / \text{Surface}_{\text{sortie}}).$$

Toutefois, on s'efforce d'adapter les appareils auditifs aux caractéristiques de la déficience auditive dont souffre le malentendant. Amplifier de façon identique toutes les fréquences, lorsqu'il s'agit de se faire entendre d'une personne souffrant de presbyacousie, reviendrait à amener les sons graves (pour lesquels la perte auditive est mineure) à un niveau insupportable à l'oreille, ou à diminuer l'amplification à un niveau supportable, risquant ainsi de rendre les sons aigus inaudibles...

Pour remédier à cet état de fait, les appareils auditifs sont pourvus de filtres qui amplifient différemment les diverses fréquences sonores arrivant à l'oreille.

6. Conclusion

Les caractéristiques particulières de l'oreille contribuent à une perception de l'univers sonore différente de ce que nous apporte la vue : plus de richesse en fréquences, nous l'avons vu, mais une localisation spatiale bien inférieure.

Nous nous sommes efforcés d'aborder les caractéristiques physiques essentielles de l'ouïe sous l'angle d'une comparaison entre la vision et l'audition. Il n'en reste pas moins que bien des points n'ont pu être évoqués : stéréophonie, « illusions sonores » qui pourraient faire l'objet d'autres articles...

7. Pour aller plus loin

- Un site complet sur tout ce qui concerne l'audition, notamment du point de vue biologique : [Voyage au centre de l'audition](#)
- Pour en savoir plus les caractéristiques physiques de la vision et sur l'œil, voir les articles du site [CultureSciences](#) et l'article du site Planet-Vie [L'œil : structure, origine et propriétés physiques](#).
- Pour en savoir plus sur la vision, en particulier du point de vue des neurosciences, voir le site [La vision](#) sur la plateforme ACCES de l'Institut français de l'éducation (IFE).

CRÉDITS

AUTEUR(S)/AUTRICE(S)

[Gabrielle Bonnet](#)

Agrégée de physique et ancienne responsable du site internet CultureSciences-Physique.

[Gilles Camus](#)

Professeur agrégé de SVT. Il a été le responsable éditorial du site Planet-Vie de 2004 à 2016.

LICENCE DU TEXTE DE L'ARTICLE

