

Unite : Appareil Neurosensoriel

APPAREIL NERVEUX ET ORGANES DES SENS

Biophysique de l'audition

Programme

I- Acoustique physique : Définition du son, paramètres physiques et caractéristiques du son, différents types du son : sons purs et complexes, propriétés du son (impédance acoustique, pression et puissance acoustique, intensité sonore, propagation du son d'un milieu à un autre), notion du décibel.

II- L'oreille et les phénomènes objectifs de l'audition Mécanisme de l'audition (rôle de l'oreille externe, l'oreille moyenne et de l'oreille interne)

III- Phénomènes subjectifs de l'audition ou qualités physiologiques des sons : Tonie d'un son, Sonie ou intensité psychologique d'un son, air de l'audition, courbes isosoniques, le phone, Timbre d'un son, Autres phénomènes subjectifs : effet masque, fatigue auditive, audition binaurale.

IV- Exploration fonctionnelle de l'audition : Définition et différents types de surdités, Détection de la surdité : Acoumétrie, Audiométrie, Tympanométrie et impedancemétrie, Potentiels évoqués auditifs, Autres explorations.

Objectifs

- Définir les propriétés des ondes sonores
- Décrire le fonctionnement de l'oreille
- Expliquer la psycho acoustique et la perception auditive
- Décrire les modes d'explorations permettant de dépister l'existence et la nature des surdités

I- Acoustique Physique

L'acoustique est l'étude des propriétés des ondes sonores, de leur production, de leur propagation et de leurs effets.

1. Les Ondes sonores: définitions

Une onde est une perturbation qui se propage. Si le milieu est homogène et isotrope, l'onde se déplace dans toutes les directions à la même vitesse v .

Une onde sonore : C'est un mouvement vibratoire mécanique qui se transmet de proche en proche dans un milieu matériel. Les sons ne se propagent pas dans le vide.

- Un son est une sensation auditive engendrée par une onde acoustique.
- Cette onde est générée par une vibration (cordes vibrantes, cordes vocales, membrane d'un haut-parleur,).
- La vibration va créer un déplacement de particules du milieu de propagation (air, eau,) autour d'une position d'équilibre.
- ✓ Dans un fluide, les ondes sonores sont tjrs longitudinales.
- ✓ Dans un milieu solide : deux composantes = ondes longitudinale + transversale
- **Onde longitudinale** : la déformation (ex. pression ou déplacement) est parallèle à la direction de propagation.
- **Onde transversale** : la déformation (ex. pression ou déplacement) est perpendiculaire à la direction de propagation.

Rappels

- **Ondes périodiques** : Une onde est périodique de période T si, pour tout temps t , l'amplitude de la déformation à l'instant $t+T$ est la même qu'à l'instant t .
- **La fréquence f** est le nombre d'oscillations effectuées par unité de temps $f = 1/T$

On peut écrire : $\lambda = vT$ ou $v = \lambda f$

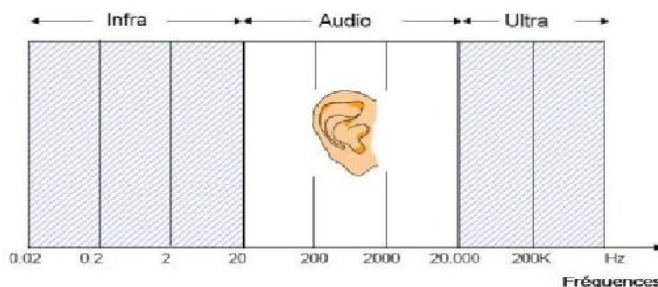
Longueur d'onde λ , est la distance parcourue par l'onde pendant une période T .

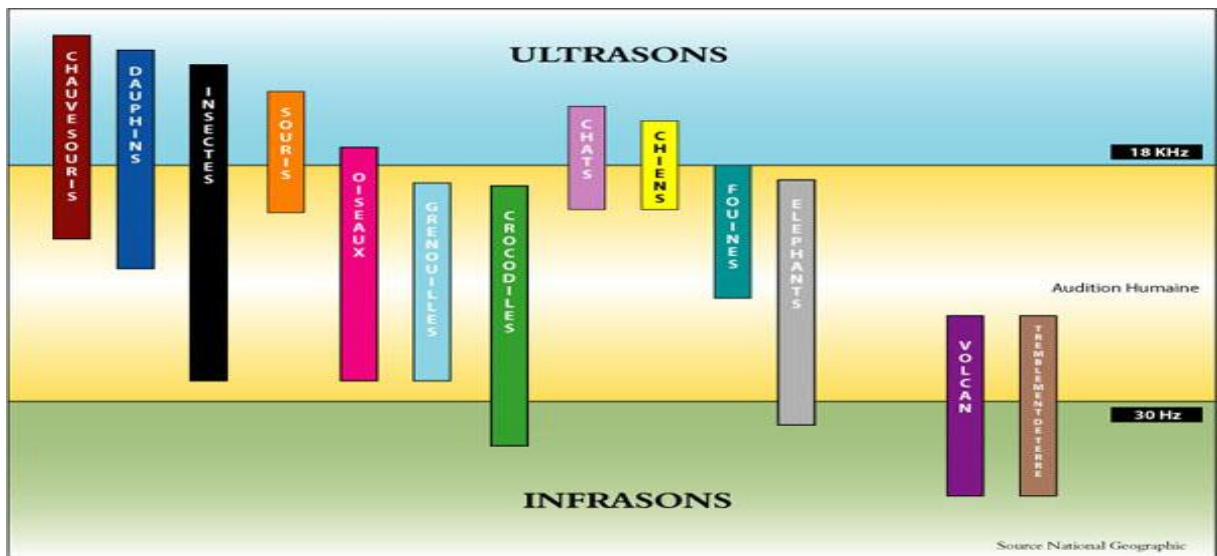
Définition: Sons et Ultrasons

- Les sons et les ultrasons sont de même nature physique.

Sons audibles : 20 Hz à 20 KHz

Ultrasons : 20 KHz à qqes GHz.





2- Classification des sons

a) Les sons purs:

La vibration des particules est caractérisée par l'équation de type:

$$x = a \sin(2\pi ft) \quad \text{et} \quad \lambda = cT = v/f$$

x : position, a : amplitude du mouvement, f : fréquence de vibration, t : temps,

λ : longueur d'onde et c : célérité du son.

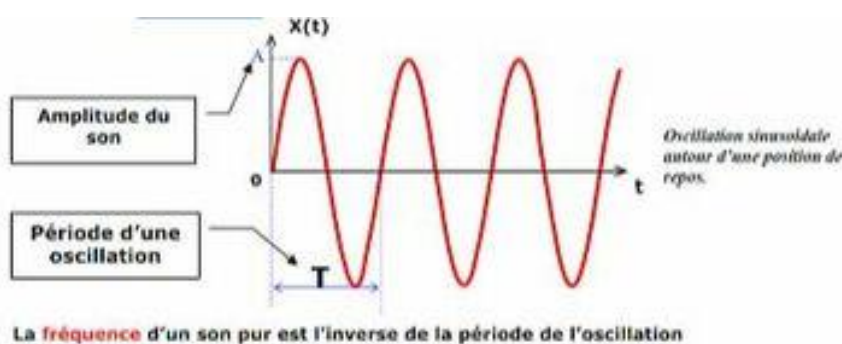
Remarques :

Notion de phase: deux sons purs peuvent entraîner les mêmes déplacements longitudinaux sur les particules d'un même milieu commun mais ces mouvements peuvent être entraînés dans le temps.

$$\text{entre } x_1 = A \sin \omega t \quad \text{et} \quad x_2 = A \sin(\omega t + \theta)$$

Même mvt des particules mais le second mvt est en avance sur le premier d'un temps:

$$\tau = \theta/\omega$$



La propagation du son se fait par transmission de vibrations d'une particule matérielle à sa voisine: il faut distinguer:

- **vitesse vibratoire ou vitesse instantanée:** vitesse locale d'une particule mise en mouvement de vibration: $v = dx/dt = a \omega \cos \omega t$

- **célérité du son:** célérité de la propagation de l'onde sonore le long de la direction.

Si le milieu est isotrope, la célérité ne dépend que des caractéristiques du milieu:

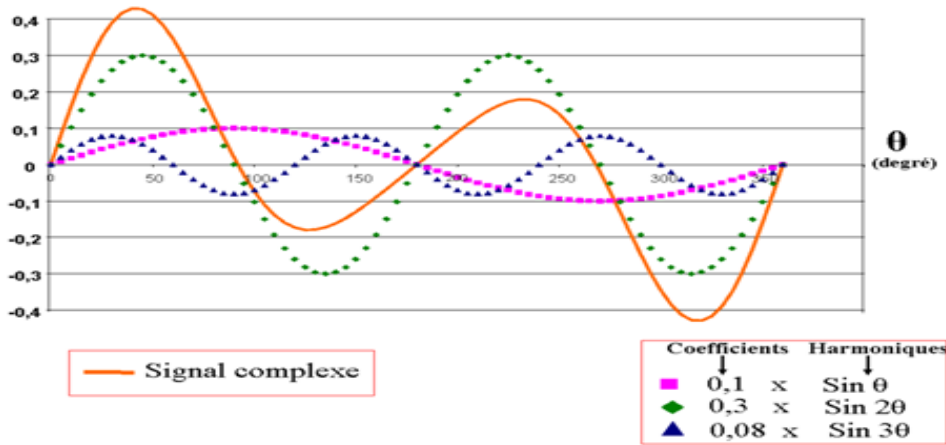
Les sons vont d'autant plus vite que les milieux sont solides.

Dans l'air: $c = 330$ à 340 m/s

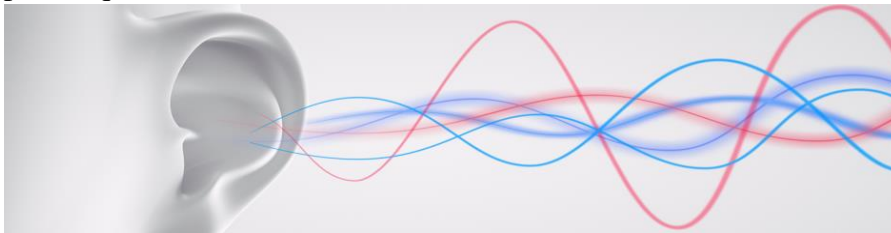
Dans l'eau: $c = 1450$ m/s
 Dans le tissu mou: $c = 1540$ m/s
 Dans l'os: $c = 3300$ m/s

b) Les sons complexes

sont produits par des particules animées de mouvements périodiques mais qui ne sont plus sinusoïdaux (ils peuvent réunir plusieurs fréquences ex. son musical).



c) **Les bruits:** ne possèdent pas de fréquence caractéristiques. Ils sont dus à des vibrations non périodiques et non sinusoïdales.



3- Propriétés du son (paramètres acoustiques)

Pression, impédance et puissance acoustiques

a) Pression acoustique

Le long de l'axe de propagation du son, les particules subissent un déplacement vibratoire sinusoïdal autour de leur position de repos, leur densité sur cet axe varie, faisant apparaître des régions plus denses et d'autres moins denses qu'à l'état de repos.

➡ des variations de pression autour de la pression atmosphérique, donc des surpressions et des dépressions par rapport à la pression de base. Cette variation est appelée la pression acoustique.

$$P = \rho v c$$

ρ : masse volumique v : vitesse acoustique c : célérité acoustique

La pression acoustique est faible devant la pression atmosphérique de $2 \cdot 10^{-5}$ à 20 Pa (par rapport à $1,013 \cdot 10^5$ Pa), soit une variation d'un rapport de 10^6 ➡ logarithme

b) Impédance acoustique

Une grandeur très importante pour la caractérisation du milieu.

$$Z = P/v = \rho c$$

Z: impédance acoustique

P: pression acoustique

v: vitesse vibratoire

c: célérité; ρ : masse volumique

Quelques valeurs d'impédance acoustique

Air $z = 0,04 \times 10^3 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$

eau $z = 1,48 \times 10^3 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$

foie $z = 1,65 \times 10^3 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$

os $z = 7,5 \times 10^3 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$

c) Puissance acoustique (ou puissance surfacique en Watt/m²)

La puissance acoustique d'un son pur est toujours rapportée à l'unité de surface

Comme $v=P/\rho c \implies W = P^2/\rho c$

$$W = \frac{d(\text{travail})}{S \cdot dt} = \frac{F \cdot dx}{S \cdot dt} = \frac{P \cdot S \cdot dx}{S \cdot dt} = P \cdot v = v^2 \cdot \rho \cdot C$$

4- Niveau sonore

La mesure du niveau de puissance acoustique se fait tjrs par comparaison avec un son de référence tel que: $W_0 = 10^{-12} \text{ Watt/m}^2$

comme l'échelle de $W/W_0 \implies 10^{12}$

\implies Unité de mesure de niveau de puissance acoustique = le logarithme décimal du rapport $W/W_0 = \text{Bel}$

En prenant comme niveau de référence, la puissance acoustique d'un son pur de 1000Hz juste audible $W_0 = 10^{-12} \text{ Watt/m}^2$

$$I = \text{Log } W/W_0$$

C'est le niveau d'intensité sonore exprimé en Bels et varie de 0 à 12.

Pour affiner la sensibilité à l'échelle, on utilise le dixième de Bels (décibels ou dB)

$$I_{\text{dB}} = 10 \text{ Log } W/W_0$$

L'échelle est comprise entre 0 à 120.

➤ Quelques exemples de niveaux sonores:

0 dB seuil d'audibilité

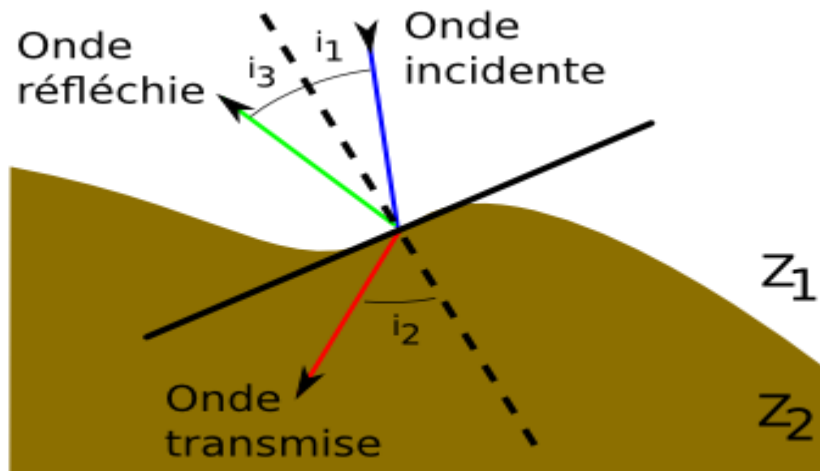
20 dB voix basse

90 dB motocyclette

120 dB avion à réaction

5- Propagation des ondes sonores (ultrasonores)

A la surface de séparation des 2 milieux infinis, un rayon sonore incident donne un rayon réfléchi qui fait un angle quelconque avec l'interface et un rayon réfracté avec un changement de direction. La propagation est rectiligne.



➤ Lois de Snell

$$\frac{\sin i}{\sin t} = \frac{C_1}{C_2}$$

➤ Le coefficient de réflexion

$$\alpha_r = \frac{I_r}{I} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

La réflexion est d'autant plus grande que la différence d'impédance entre les deux milieux est grande.

L'interface liquide-gaz ou tissu-gaz est pratiquement impénétrable aux ultrasons.

Ex: Les explorations pulmonaire et intestinale sont impossibles aux ultrasons.

➤ Le coefficient de transmission

$$\alpha_t = \frac{I_t}{I} = \frac{4Z_2Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

L'autre partie du faisceau est transmise (par réfraction) dans le second milieu avec une atténuation d'autant plus forte que l'on s'éloigne de l'interface.

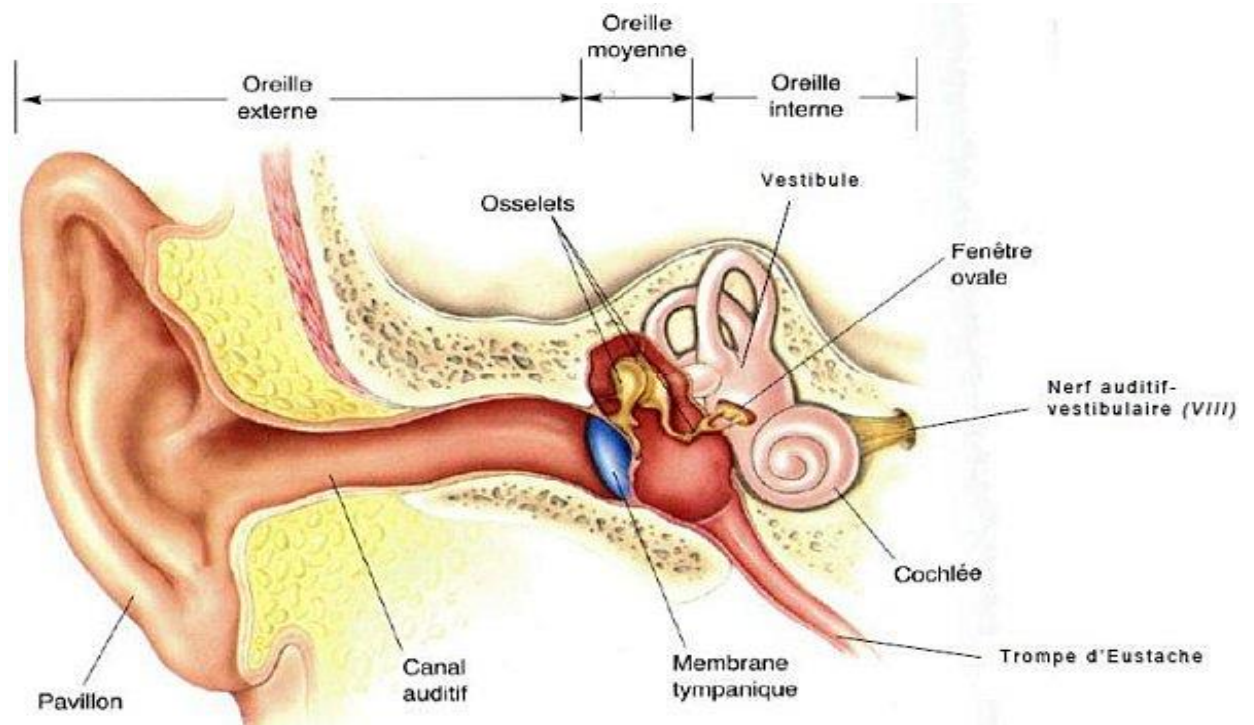
Comme l'intensité incidente ne peut être réfléchi ou transmise:

$$\alpha_r + \alpha_t = 1$$

II- L'oreille et les phénomènes objectifs de l'audition

L'oreille est l'organe de l'audition. Elle joue un rôle majeure dans l'équilibration.

L'oreille est formée d'un appareil de transmission (oreille externe et moyenne) et d'un appareil de perception (oreille interne).



L'oreille est composée de :

- l'**oreille externe** qui capte les sons au niveau du pavillon et les amène jusqu'au tympan par le conduit auditif.
- l'**oreille moyenne** qui a un rôle de transmission ; par l'intermédiaire de la chaîne des osselets, elle transporte les vibrations du tympan à l'oreille interne.
- l'**oreille interne** renferme à la fois l'organe de l'équilibre, le labyrinthe, et la cochlée qui est l'organe de l'audition. Celle-ci abrite les cellules sensorielles ou cellules ciliées qui transforment le son en influx nerveux, transmis au cerveau par le nerf auditif.

Appareil de transmission

C'est un transformateur d'énergie. Il fait passer les ondes sonores d'un milieu aérien dans un milieu liquide.

Les sons, captés par le pavillon, canalisés par le conduit auditif externe, font vibrer le tympan à la manière d'une membrane de microphone.

La vibration de la membrane tympanique entraîne la vibration de la chaîne des osselets (amplification du son).

Le mouvement platinair (osselets) provoque le déplacement des liquides de l'oreille interne ➡ excitation de l'organe de Corti.

Appareil de perception

Les vibrations acoustiques sont arrivées aux cellules sensoriels de Corti.

- ✓ L'organe de Corti transforme l'énergie mécanique en énergie nerveuse.
- ✓ Par le nerf auditif, l'influx nerveux arrive jusqu'aux aires auditives du cerveau qui donnent naissance à la sensation auditive. Celle-ci est interprétée par d'autres éléments du cerveau.

- ✓ La trompe d'Eustache (équilibreur de pression): Un tuyau mou équilibre les pressions entre l'air dans l'oreille moyenne et l'air atmosphérique dans le nez.

Le système d'équilibration

L'oreille interne comprend un organe d'équilibration composé du vestibule et des canaux semi-circulaires.

Notre système d'équilibre repose sur le labyrinthe, qui est une combinaison d'os et de tissus situés dans l'oreille interne. Il comprend différentes parties tels que les canaux semi-circulaires, les organes otolithiques et la cochlée. La cochlée est utilisée pour entendre alors que les canaux semi-circulaires sont utilisés pour l'équilibre.

Chaque canal est responsable de la détection d'un type de mouvement différent. L'un détecte le mouvement vertical, l'autre le mouvement horizontal, et le dernier détecte l'inclinaison.

Lorsque le liquide des canaux se met en mouvement, les cellules ciliées le détectent et renseignent notre cerveau. Cela nous permet de comprendre comment nous nous déplaçons dans l'espace.

Résumé:

- Organe d'équilibration (vestibule et canaux semi-circulaires)
- Organe d'audition (cochlée)

III- Les phénomènes subjectifs de l'audition ou qualité physiologique des sons

Notion de subjectivité: les qualités sont étudiées avec la participation active du sujet
Absence de proportionnalité entre les paramètres physiques et les phénomènes subjectifs.

La sensation sonore est décrite par 3 qualités principales:

1. Hauteur ou tonie

Qualité de la sensation qui fait dire que le son est grave (fréquences basses) ou aigu (fréquences élevées).

Elle est liée essentiellement à la fréquence. Plus le son paraît aigu (grave) plus il est haut (bas)

La bande de fréquence (20-20KHz) diminue avec l'âge (la presbyacousie).

Pour déterminer une échelle des hauteurs, il faut étudier le Seuil différentiel relatif de tonie: $\Delta f/f$,

Δf : le seuil différentiel de tonie c'est la capacité de percevoir une différence de hauteur entre deux sons de fréquences différentes.

Le problème est de chercher pour chaque fréquence f quel est le seuil Δf minimal pour que les sons de fréquence f et $f+\Delta f$ soient perçus comme de hauteurs différentes

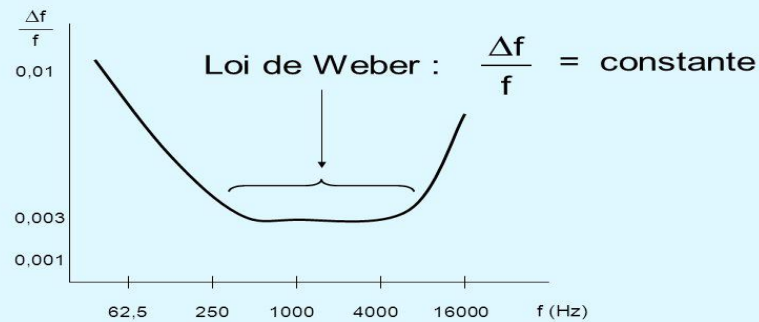
Loi de Weber -Fechner: Soit f (fréquence) capable de produire une sensation auditive H (tonie) indique que la variation relative de hauteur dans un domaine bien défini est constante.

Pour les sons audibles le SDR est constant pour les fréquences moyennes et élevé aux extrémités.

- $500\text{Hz} < f < 8000\text{Hz}$, $Df/f = 0,2 - 0,3 \%$
- $\Delta f/f \Rightarrow 10^{-3}$ pour des sujets entraînés (accordeurs de piano)

3.2 Hauteur

Seuil différentiel relatif pour la tonie



CNEBMN – Séminaire de Biophysique du 7 novembre 2011 – Acoustique physiologique

Pour deux sensations différentes:

$$H_2 - H_1 = k \cdot \text{Log} f_2 / f_1 = \text{intervalle}$$

- ✓ Au rapport de fréquences correspond une différence de hauteurs
- ✓ Cette différence de Hauteurs est exprimée en octave.

Définition de l'octave

C'est l'unité d'intervalle tonie séparant deux sons dont l'un a une fréquence double de l'autre:

$$1 \text{ octave} = k \text{ Log} 2$$

Autre unité: le savart pour lequel $k=10^3$

$$1 \text{ octave} = 300 \text{ savarts} = 10^3 \text{ log} 2$$

Autres phénomènes qui peuvent intervenir dans la sensation de tonie

La sensation de hauteurs ne dépend pas exclusivement de la fréquence

- **Phénomène de Burton:** Si on fait entendre successivement 2 sons purs de même fréquence mais d'intensité différente, le son le plus fort paraît plus grave. (donc la puissance intervient pour modifier la tonie)
- **Phénomène du clic:** Si la durée d'un son est inférieure à 25ms, le sujet ne percevra qu'un clic sans sensation de hauteur.

2. La sonie ou sonorité ou intensité psychologique d'un son

C'est la qualité de la sensation qui fait dire que le son est fort ou faible. Elle est liée principalement à la puissance acoustique (ou intensité acoustique) et secondairement à la fréquence.

$$S = k \text{ log} W / W_0$$

$$W_0 = 10^{-12} \text{ Watt.m}^{-2} \text{ à } 1000 \text{ Hz}$$

Cette qualité de sensation se quantifie en unité « phone » et nécessite la participation active du sujet

Le phone est étalonné sur une l'échelle de dB par rapport à un son de 1000Hz.

cad un son de 1000Hz a une sonie de n phones.

Notion de seuil absolu: intensité au-dessous duquel absence de perception

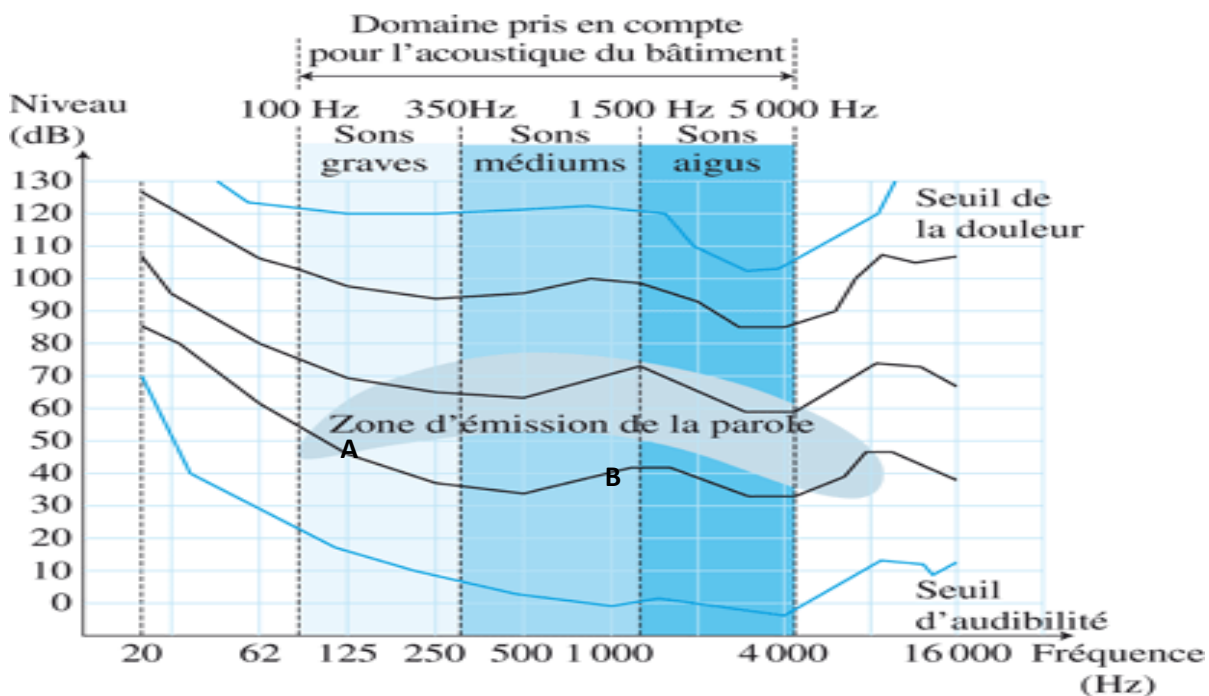
Minimum de 1000 à 5000

Fréquence (Hz)	Seuil absolu (dB)
125	20
250	10
500	5
1000	0
2000	-3
4000	-5
8000	15

La zone de l'aire auditive s'étend entre le seuil minimum de l'audition et le seuil douloureux.

On établit les courbes seuils avec des sujets en faisant varier à la fois le niveau sonore en dB et la fréquence en Hz.

Les courbes isosoniques = les points de même sensation d'intensité sonore



Courbes isosoniques de Fechner: Un son de fréquence 125 Hz et d'intensité 50 dB donne la même impression d'intensité qu'un son de fréquence 1000Hz et d'intensité sonore 40 dB . On dit que la sonie de A est de 40 phones (la sonie de B également)

3. Le timbre

Le timbre est la qualité d'un son qui permet de reconnaître deux sons de même hauteur et de même sonie émis par deux instruments différents.

Ex: Do joué par un violon et une flute.

Le timbre est lié au spectre de fréquences du son.

Autres phénomènes subjectifs

- **Sons subjectifs:** un son pur très puissant est entendu avec des harmoniques ➡ Son complexe
A cause des phénomènes non linéaires au niveau de la cochlée.
- **Superposition de deux sons:** deux sons de même intensité et de fréquence f_1 et f_2 très voisines ➡ un son de fréquence $(f_1+f_2)/2$ dont l'amplitude maximale est modulée à f_1-f_2 (amplitude d'une sinusoïde qui s'annule à f_1-f_2).
- **Effet de masque**
Le seuil absolu d'audibilité d'un son est augmenté par l'audition simultanée d'un autre son plus intense appelé masquant.
Un son est d'autant plus masquant que sa fréquence est inférieure au son masqué.
- **Fatigue auditive**
 - . Le seuil absolu d'audibilité est plus élevé après l'audition d'un son intense.
 - . Augmente avec la durée et l'intensité du son fatigant
 - . Plus marquée pour les sons plus aigus que le son fatigant.
- **Audition binaurale**
L'audition normale fait appel aux deux oreilles (audition binaurale) avec un abaissement des seuils liminaires et la possibilité de localiser l'origine spatiale des sons.
 - . **Abaissement des seuils liminaires**
Le seuil en audition binaurale est plus bas que le seuil de la meilleure oreille en audition monaurale. La différence est d'environ 3dB (sommation cérébrale des puissances appliquées à chaque oreille).
 - . **Orientation auditive** : direction d'une source donnée
 - Différence de phase: Le son met plus de temps pour atteindre l'oreille la plus éloignée
 - Différence d'intensité: du fait de l'effet d'ombre de la tête.

IV- Exploration fonctionnelle de l'audition

L'audition d'un sujet peut être évaluée en utilisant des méthodes objectives et des méthodes subjectives. Les méthodes objectives sont basées sur l'enregistrement de l'activité électrique des divers relais de la voie auditive et ne font pas appel à la participation du sujet. A l'inverse, les méthodes subjectives font intervenir la perception auditive du sujet et nécessitent sa coopération.

L'exploration de l'audition a pour buts de :

- Déceler une surdité (ou hypoacousie),
- Apprécier l'importance,
- rechercher la cause
- tester l'oreille après un traitement médical, chirurgical ou prothétique

Classification des surdités

Une surdité est une baisse importante ou totale des capacités d'audition d'un individu, qui peut toucher les deux oreilles ou un seul côté.

. Les surdités de transmission

Elles ont pour origine le plus souvent des troubles mécaniques au niveau du tympan ou de la chaîne des osselets (oreille interne et oreille externe). La chirurgie peut donner de bons résultats.

. Les surdités de perception

Elles affectent l'oreille interne et sont difficilement accessibles à la chirurgie.

L'adoption de prothèses auditives à fréquence et intensité variables permet de lutter contre ce type de surdité.

. Les surdités mixtes

dues soit à la coexistence fortuite d'une lésion de l'oreille moyenne et d'une atteinte de la perception, soit à l'évolution d'une lésion de transmission à l'oreille interne (otospongiose = otosclérose).

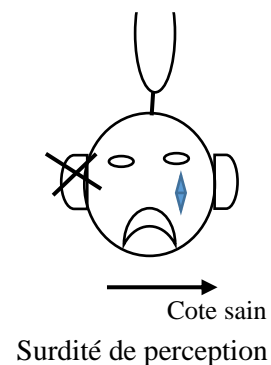
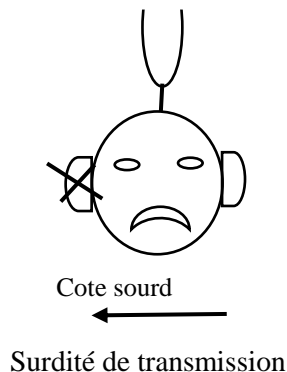
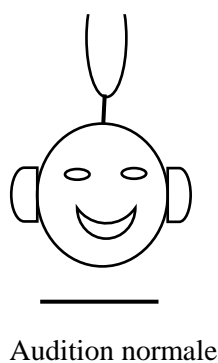
1- ACOUMETRIE : épreuves de Rinne et de Weber

L'acoumétrie consiste à explorer l'audition à l'aide d'un diapason. Les épreuves de Rinne et de Weber, essentiellement qualitatives, permettent de différencier les surdités neurosensorielles des surdités de transmission.

Epreuve de WEBER

Le diapason est appliqué sur le front. On peut utiliser différentes fréquences.

- Le weber est dit indifférent lorsque le patient entend le diapason des deux côtés.
- Il est latéralisé du côté sourd dans les surdités de transmission.
- Il est latéralisé du côté sain dans les surdités de perception



Epreuve de RINNE

- Avec le diapason, on compare la durée de perception de la vibration sonore par voie aérienne et par voie osseuse.

- Une oreille normale entend plus longtemps les vibrations par voie aérienne que par voie osseuse.

- **Réalisation** : le diapason est appliqué sur la mastoïde (os du crâne situé derrière l'oreille). Lorsque le patient cesse de percevoir la vibration, on place le diapason en regard du conduit auditif :

- si le patient entend encore pendant un certain temps, on dit que le Rinne est positif. Il s'agit d'une audition normale, ou d'une surdité de perception.

- si le patient, qui a entendu par voie osseuse, n'entend plus par voie aérienne, on dit que le Rinne est négatif. Il s'agit d'une surdité de transmission.

Audiométrie

C'est la méthode la plus utilisée et la plus précise. Elle nécessite un audiomètre, générateur de sons purs dont on peut fixer la fréquence (par exemple de 125 à 8000Hz, selon une progression géométrique) et l'intensité sonore (par exemple de 0 à 120 dB par pas de 10dB)

1- Audiométrie tonale liminaire

Principe

On recherche les seuils auditifs pour chaque oreille, à différentes fréquences, en conduction aérienne et en conduction osseuse.

- La conduction osseuse évalue les performances de l'oreille interne et du nerf auditif;
- la conduction aérienne évalue les performances de l'oreille externe, de l'oreille moyenne, de l'oreille interne et du nerf auditif.

Réalisation

Chaque oreille est testée séparément, dans une cabine isolée du bruit.

- Pour la conduction aérienne, on utilise un casque. L'audiomètre délivre des sons purs de 125Hz (graves) à 8000 Hz (aigus), à des intensités croissantes de 0 dB (seuil auditif normal) à 120 dB.

Il s'agit de sons continus, ou discontinus, ou wobulés (cyclique).

- Pour la conduction osseuse, on utilise un vibreur, appliqué sur la mastoïde, et relié à l'audiomètre.

Résultats

Les seuils sont reportés sur un graphique appelé audiogramme. Les fréquences sont en abscisses, les décibels (dB) de perte auditive sont placés en ordonnées.

- Les seuils normaux correspondent à 0 dB (0dB de perte auditive).
- La différence des seuils de conduction aérienne et de conduction osseuse est appelé Rinne audiométrique.

2- Audiométrie vocale

Principe

L'audiométrie vocale mesure le % d'intelligibilité des mots= nombre de mots compris/nombre de mots prononcés.

Réalisation

On teste chaque oreille séparément, à l'aide d'écouteurs. L'audiométriste lit au patient des listes de mots étalonnés en fréquence et en durée, à une intensité croissante.

Interprétation

Le seuil d'intelligibilité, en dB, correspond à l'intensité sonore permettant la reconnaissance de 50 % des mots.

Le maximum d'intelligibilité, en pourcentage, correspond à la meilleure intelligibilité obtenue. Chez le sujet normal, il est de 100%.

Le pourcentage de discrimination, est le pourcentage de mots répétés pour une intensité supérieure à 35 dB au dessus du seuil d'intelligibilité. Chez le sujet normal, il est de 100%.

Explorations fonctionnelles objectives

Ces explorations ne nécessitent aucune participation active du sujet et éliminent donc toute interprétation subjective.

Tympanometrie

permet d'estimer la souplesse du tympan en mesurant sa déformation sous l'effet de pressions variables.

Impedancemetrie

évalue l'impédance acoustique de l'oreille moyenne (qui augmente avec la rigidité du système des osselets) ; elle permet également d'étudier la contraction reflexe du muscle stapédien sous l'effet d'une stimulation sonore intense (environ 70 dB à 500 Hz, 1kHz et 2kHz).

Potentiels évoqués auditifs (PEA)

En présence d'un signal acoustique, la dépolarisation des fibres auditives provoque un champ électrique. Ce champ peut être enregistré à distance, par des électrodes de surface. Les potentiels évoqués auditifs représentent la sommation de la dépolarisation des différentes étapes de la transmission auditive.