



UE / ENSEIGNANT : UE20 – SYSTÈME NEUROSENSORIEL ET PSYCHIATRIE – LE ROUX

DATE : 10/12/2024

GRUPE : COURTET Pierre, MORÉ Andréas, MICHEL Lilou

REMARQUES : Pas de changement

PHYSIQUE ACOUSTIQUE

Table des matières

Propriétés des ondes sonores

A) Distinction Son/bruit	3
B) Définition : son	3
C) Définition : bruit	3
D) Définition : diapason et audition	4
E) Définition : pression acoustique	5
F) Définition : décibels	6

Phénomènes subjectifs de l'audition

A) tonie = hauteur	7
1) Définition	7
2) Seuil absolu de hauteur	8
3) Seuil différentiel absolue de hauteur	8
4) seuil différentiel relatif de hauteur	8
B) Sonie	9
1) définition	9
2) seuil absolu	9
3) seuils différentiel de sonie	10
C) Timbre	10
D) Autres phénomènes subjectifs de l'audition	11
1) sons subjectifs	11
2) fatigue auditive	11
3) orientation auditive	11

Phénomènes objectifs de l'audition

A) Rappels anatomiques	13
B) Oreille externe - oreille moyenne	12
1) Oreille externe (OE)	12
2) Oreille moyenne (OM)	13
C) Oreille interne (OI)	136
1) composition	16
2) organe de corti	20
3) fonction de l'oreille interne	21
D) Résumé	25

Type de surdité

A) surdité de transmission	26
----------------------------	----

1) atteinte de l'oreille externe	26
2) atteinte de l'oreille interne	27
B) surdité de perception	27
1) traumatisme	27
2) toxi-infection	27
3) causes de surdité de perception chez l'enfant (exemples)	28
4) troubles liquidiens	28
5) presbycusie	28
6) tumeurs	28
C) Exemples	28

Exploration de la fonction auditive **29**

A) Acoumétrie	29
1) Epreuve de Rinne	29
2) test de weber	31
3) conditions expérimentales	31
B) Audiométrie	32
1) Audiométrie vocale : test d'intelligibilité	32
2) Audiométrie tonale liminaire	33
C) Impédancemétrie	35
D) Potentiels évoqués auditifs	36
E) Otoémissions spontanées et provoquées	37

I) Propriétés des ondes sonores

Définition : onde sonore :

Subjectivement : sensation retirée grâce à l'oreille

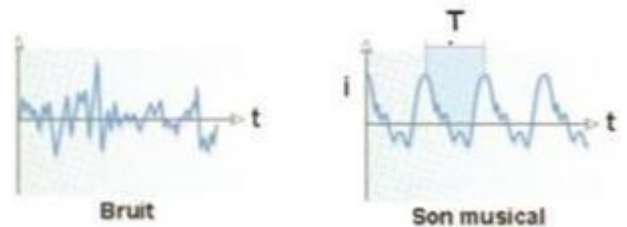
Objectivement : vibration d'un milieu matériel

C'est une onde mécanique progressive qui se propage dans un milieu matériel élastique (gazeux, liquide, solide). Elle est caractérisée par le mouvement des particules (succession de compression/décompression périodique du milieu) qui constituent le milieu de propagation : transmission de proche en proche.

Les ondes sonores ne se propagent donc **pas** dans le vide.

A) Distinction Son/bruit

Sons et bruits sont tous deux des sensations auditives perçues par les oreilles et ayant pour origine un mouvement.



Bruits: brutal et désordonné (sons désagréables) (ex : porte qui claque, explosion)

Sons: sensation non désagréable (vent dans les arbres, voix qui chante, diapason frappé), sinusoïdale (de répétition régulière et périodique)

Dispositif d'observation

La figure observée sur l'écran de l'oscillographe cathodique reproduit fidèlement le mouvement de la membrane des micros. Des expériences ont montré que :

- **Bruits** : Signal confus, désordonné
- **Sons** : Signal dit sinusoïdal, ordonné par la périodicité (Voix humaine)

Le signal correspondant un son présentant un motif qui se produit régulièrement : il est **périodique**.

B) Définition : son

C'est un phénomène **périodique** :

- produit par la vibration très rapide d'un corps matériel (cordes vocales)
- transmis par un milieu matériel
- perçu par la vibration de certains organes de l'oreille (membrane du tympan) ou par celle d'autres détecteurs (micro).

La source vibre en effectuant un grand nombre de fois le même mouvement, ce qui crée une succession de dépressions et de compressions dans le milieu de propagation. Le son est caractérisé par 2 grandeurs principales :

- **Période** : La durée d'un mouvement de la source. On la note **T** et on la mesure en secondes (s).
- **Fréquence** : inverse de la période ; le nombre de mouvements effectués par la source en une seconde s'appelle la fréquence de la source. On la note **N** et on l'exprime en Hertz (Hz).

Au sein des sons, on distingue deux types de sons :

- **Son pur** : son sinusoïdal (une seule période sinusoïde parfaite)
- **Son complexe** : son périodique associant plusieurs sinusoïdales

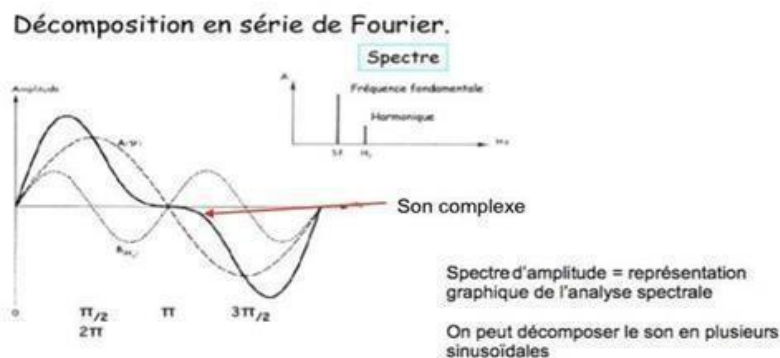
Selon le théorème de Fourier, il est possible de décomposer un son complexe en sons purs :

« Toute fonction périodique du temps de fréquence f peut être décomposée en une somme de fonctions sinusoïdales du temps de fréquence $f, 2f, 3f, \dots$ ».

1 son simple correspond à 1 seule fréquence.

Au total, un son complexe de fréquence f est donc la somme de plusieurs sons purs :

- un son pur de fréquence f appelé « fondamental »
- des sons purs de fréquence $2f, 3f, \dots nf \dots$ appelés « harmoniques ». Les harmoniques sont des multiples de la fréquence fondamentale.



En gras : son complexe

En pointillés larges : son de fréquence fondamentale f , le plus simple des sons complexes

En pointillés fins : harmonique de fréquence $2f$

C) Définition : bruit

Son non périodique, le plus souvent bref, aucune périodicité, avec une multitude de composantes.

NB : Cas du « bruit blanc » à spectre continu. Il est parfois utilisé pour assourdir une oreille. Son amplitude est la même quelle que soit sa fréquence.

D) **Définition : diapason et audition**

Diapason : « instrument de métal formé d'une lame en U montée sur une tige, couramment utilisé au cours du diagnostic des surdités et des maladies neurologique » (Larousse)

Le diapason est fait d'un matériau avec des caractéristiques particulières.

On applique une force sur le diapason de façon à provoquer une vibration : un son est émis (onde mécanique) à une fréquence précise. On peut ainsi tester l'audition du patient pour différentes fréquences.

Il en existe plusieurs types (fonction de leur épaisseur, de longueur...) dont chacun est spécifique d'une fréquence.

Diapason classique : 440 Hz = 440 allers-retours/seconde
 $T = 1/440$ ou $T = 1/N$.

à garder en tête: Les fréquences perçues par l'oreille humaine sont comprises **entre 20 Hz et 20 000 Hz** mais cet intervalle diminue avec l'âge de façon physiologique ou parfois de façon plus importante (presbyacousie).

- $N < 20$ Hz = infrasons (on ne les entend pas)
- $N > 20\ 000$ Hz = ultrasons, perçus par certains animaux.

La fréquence du diapason, 440 Hz, se situe dans la gamme d'audition où l'oreille est la plus sensible (environ 1000 Hz).

- Fréquences faibles → sons graves
- Fréquences élevées → sons aigus

La vitesse de propagation ou **célérité** d'un son dans un milieu élastique possède une propriété remarquable. Elle dépend **uniquement** du milieu considéré (notamment pression et température) et ne dépend pas du son (timbre, puissance) qui se propage.

Ex : dans l'air à température ordinaire : $C = 340$ m/s

Les sons ont tous la même vitesse de propagation, c'est le milieu dans lequel ils évoluent qui changent leur vitesse.

Pendant le temps t le son parcourt une distance λ (variant avec la célérité du son) telle que :
 Distance = Vitesse x Temps = Vitesse / Fréquence

E) **Définition : pression acoustique**

1) Pression acoustique p

$P = P_M - P_0$

P : pression acoustique

P_M : pression instantanée du fluide en M

P_0 : pression du fluide à l'équilibre

La pression acoustique peut aussi être exprimée en fonction de l'impédance acoustique :

$\rho = Zv$

$Z = \rho C$

Z : impédance acoustique = Masse volumique x célérité (ρc)

v : vitesse de déplacement des particules dans le milieu

ρ : masse volumique

C : célérité (vitesse de propagation de l'onde).

L'oreille est très sensible aux variations (même très faible) de pression acoustique (Pa ou Pascals) car le rapport de pressions entre le premier son audible et le premier son douloureux est de 10^6 .

Seuil d'audibilité : $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Seuil douloureux : $P = 20$ Pa

2) Puissance sonore

Flux d'énergie en watts.

3) Intensité sonore

Puissance surfacique = intensité sonore physique = flux d'énergie par unité de surface d'onde.

Pour une onde sphérique, on a :

$$I = \frac{W_r}{S} \quad I = \frac{W}{4\pi r^2}$$

F) Définition : décibels

L'échelle de sensibilité de l'oreille est découpée en **120 décibels** par l'échelle logarithmique des décibels (0 dB = le premier son perçu par l'oreille et 120 dB = son dangereux). Le niveau sonore L d'un son de puissance surfacique W par rapport un son surfacique W_0 est égal à, en bels (B) :

W_0 = puissance de référence = $10^{-12} \text{ w.m}^{-2}$ (seuil d'audibilité à 1000 Hz)

L'oreille commence à entendre qqchose à 1000Hz pour un son de puissance surfacique de $10^{-12} \text{ w.m}^{-2}$

0 dB = seuil de l'audition chez l'Homme

$$L = \log \frac{W}{W_0}$$

$$L = 10 \log \frac{W}{W_0} \text{ (dB)}$$

Pression $\text{N.m}^{-2} =$ Pa	Puissance W.m^{-2}	dB SPL	Exemple
200	100	140	Avion, Seuil douleur
20	1	120	Atteinte cellules ciliées
6,32	10^{-1}	110	Seuil inconfort
2	10^{-2}	100	Motos, marteau piqueur
$2 \cdot 10^{-1}$	10^{-4}	80	Circulation, rue à gros trafic
$2 \cdot 10^{-2}$	10^{-6}	60	Conversation
$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-8}	40	Pièce tranquille
$2 \cdot 10^{-4}$	10^{-10}	20	"La nuit", voix chuchotée
$2 \cdot 10^{-5}$	10^{-12}	0	Seuil audition personne jeune 1 à 5 kHz
$6,3 \cdot 10^{-6}$	10^{-13}	-10	Seuil chat 1 à 10 kHz

L'échelle Logarithmique est plus évidente car exprimée en décimales.

Pour comprendre

Exemple 1:

2 sources sonores émettent 2 sons de niveaux sonores proches $L_1 = 90 \text{ dB}$ et $L_2 = 80 \text{ dB}$. **La résultante des deux sons n'est pas la somme de ces derniers.** En réalité, quand on associe deux sons d'intensités sonores assez proches, la résultante a une intensité légèrement plus élevée que celle des deux premières.

Le passage d'un camion dans une rue bruyante n'augmente pas le volume du son, ou seulement très légèrement.

10 x log : pour pouvoir exprimer en décibel, sinon cela serait exprimé en bel.

$$\begin{aligned} \text{Comme } L_1 &= 10 \log \frac{W_1}{W_0} & \text{alors } W_1 &= W_0 \cdot 10^{\frac{L_1}{10}} \\ \text{et } L_2 &= 10 \log \frac{W_2}{W_0} & \text{et } W_2 &= W_0 \cdot 10^{\frac{L_2}{10}} \\ \text{donc } W &= W_1 + W_2 = W_0 (10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}}) & L &= 10 \log \frac{W}{W_0} = 10 \log (10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}}) \\ & & L &= 10 \log (10^{\frac{90}{10}} + 10^{\frac{80}{10}}) = 90.4 \text{ dB} \end{aligned}$$

Exemple 2 :

Quand la puissance est multipliée par 10, le niveau sonore augmente de 10 dB. (1^{ère} équation)

$$\begin{aligned} W_2 &= 10W_1 \\ L_2 - L_1 &= 10 \log \frac{W_2}{W_1} = 10 \log 10 = 10 \text{ dB} \end{aligned}$$

Quand la puissance est multipliée par 100, le niveau sonore augmente de 20 dB. (2^{ème} équation).

$$\begin{aligned} W_2 &= 100W_1 \\ L_2 - L_1 &= 10 \log \frac{W_2}{W_1} = 10 \log 100 = 10 \log 10^2 = 20 \text{ dB} \end{aligned}$$

Exemple 3 :

L'addition de 2 sons identiques n'est pas égale à la somme des niveaux sonores de ces deux sons. On augmente donc de 3 décibels les deux sons.

$$\begin{aligned} \text{si } W_2 &= 2W_1 \\ \text{alors } L_2 - L_1 &= 10 \log \frac{W_2}{W_1} = 10 \log \frac{2W_1}{W_1} = 10 \log 2 = 3 \text{ dB} \end{aligned}$$

Exemple 4 :

Varié le niveau sonore lorsqu'on double la distance par rapport à la source sonore placée en milieu isotrope revient à diminuer de 6 dB le niveau sonore.

Puissance W_1 à la distance r_1
Puissance W_2 la distance $r_2 = 2r_1$

II) Phénomènes subjectifs de l'audition

3 paramètres physiques sont utilisés pour décrire une onde sonore :

- La fréquence
- L'intensité sonore ou puissance surfacique
- Le spectre d'amplitude

À ces propriétés physiques correspondent à des sensations auditives (la mesure directe d'une sensation est impossible).

Caractéristique du son	Perception
Fréquence	Hauteur/tonie → son aigu ou grave
Intensité sonore	Sonie → son fort ou faible
Spectre d'amplitude	Timbre → 2 sons de fréquence et puissance identiques créés par deux instruments différents (différentes gammes)

La mesure directe de la sensation est impossible.

Les sensations perçues au niveau de l'oreille croissent moins vite que le stimulus leur donnant naissance. Un changement de 1 Hz ne sera pas forcément ressenti au niveau de l'oreille.

A) Tonie = hauteur

1) Définition

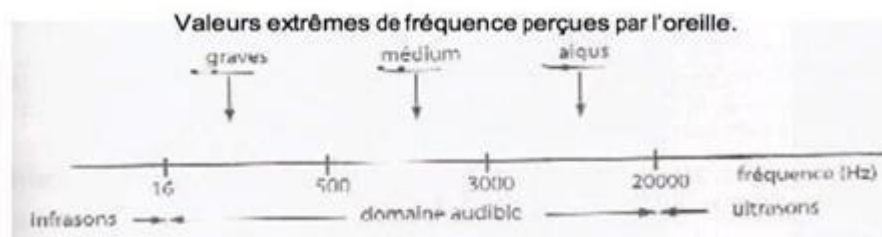
La tonie = La hauteur est reliée à la fréquence du son.

C'est la qualité sonore physiologique distinguant un son aigu d'un son grave :

- **Son aigu** : fréquence élevée
- **Son grave** : fréquence basse

NB : Il faut également tenir compte de **l'intensité du son** (plus il est intense, plus il va sembler grave) et de **la durée du son** (il faut au minimum 10 ms pour que l'oreille puisse analyser un son).

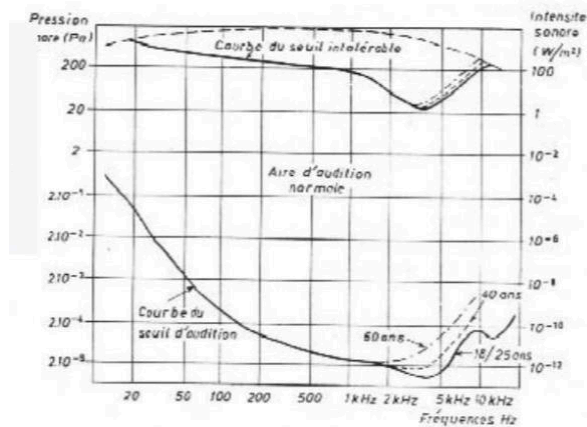
2) Seuils absolus de hauteur



Valeurs extrêmes de fréquences perçues par l'oreille.

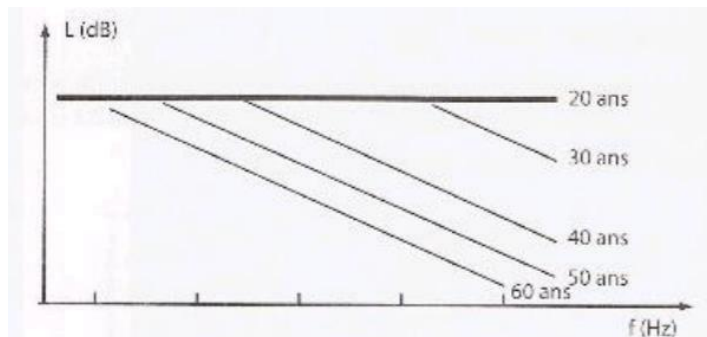
20 Hz < sons graves < 500 Hz < sons intermédiaires < 3000 Hz < sons aigus < 20 000 Hz

16 Hz (Infrasons) ≤ Oreille normale ≤ 20 000 Hz (Ultrasons)



L'âge induit une variation du domaine audible, dite presbycusis (presbytie de l'audition). Le degré de dégénérescence varie selon les individus. Il existe des variations inter-espèces (les chauves-souris entendent les US).

Les personnes âgées ont du mal à discriminer les sons aigus car ça diminue en premier pour les sons de fréquence élevée.



Pour chaque fréquence, on évalue le ressenti au niveau de l'oreille en faisant progressivement varier la fréquence et la puissance sonore. On cherche à définir le moment où le patient entend un premier son (seuil minimal) et celui où ce dernier devient douloureux.

3) Seuil différentiel absolu de hauteur

Variation de fréquence nécessaire pour que l'oreille perçoit une différence. C'est une notion **inconstante** et donc relativement peu utilisée.

$$\Delta N = N_2 - N_1 \text{ avec } \Delta N \text{ inconstant : augmente quand fréquence augmente}$$

4) Seuil différentiel relatif de hauteur

$\Delta N/N = 1/80$ (moyenne pour un individu normal) = *quand je suis à 80Hz, il faut 1 Hz pour discriminer un son différent.*

Augmentation minimum pour que l'oreille sente qu'il y est un son différent.

Exemple :

Seulement 1 Hz de plus est suffisant pour obtenir un son différent à 80 Hz mais 10 Hz de plus seront nécessaires à 800 Hz pour que l'oreille puisse faire la différence entre les 2 sons.

NB : Les musiciens (1/1000) possèdent des seuils relatifs très élevés, ils sont capables de faire la différence entre de toutes petites variations de fréquence. L'oreille est la plus sensible entre 400 et 4000 Hz aux différences de fréquences. Pour une personne lambda c'est 1/300.

Lorsque 2 sons de fréquences différentes sont émis simultanément, ils constituent **un accord**. Cet accord est conservé si le rapport des fréquences entre les deux sons est conservé.

Pour 2 sons de fréquence f_1 et f_2 , l'écart H , en **Savart** de fréquence est donné par :

$$H=1000 \log f_2/f_1$$

Une octave est un intervalle entre sons dont la fréquence de l'un est le double de l'autre (octave = 300 Savarts)

Loi de Weber-Fechner : Loi fondée sur des faits expérimentaux. Étude quantitative entre perception auditive et stimuli sonores selon laquelle la sensation varie comme le logarithme de l'excitation.

P = stimulus qui provoque une sensation S

S = Sensation

ΔP = variation de stimulus minimale pour provoquer une variation minimale de ΔS

$$\frac{\Delta P}{P} = k \Delta S$$

$$S = K \log P$$

B) Sonie

1) Définition

La sonie est reliée à la **puissance du son**. La sonie est la qualité physiologique d'un son définissant sa force (permettant de dire si le son est fort ou faible), elle dépend de différents paramètres :

- **Puissance acoustique** (plus elle est importante, plus le son est fort)
- **Fréquence**
- **Durée** (Besoin d'au moins 100 ms) pour déterminer si le son est fort ou faible

2) Seuil absolu

Pour être perçus, les sons doivent présenter une puissance minimale. Au-delà d'une intensité maximale = le seuil Haut, le son devient douloureux. Pour un individu normal, le maximum de sensibilité est entre 1000 et 3000 Hz.

L'étude du seuil absolu se fait par l'audiométrie.

Diagramme de Wegel :

On fait varier les fréquences, puis monter la puissance afin de définir le moment où le patient entend un son puis le trouve douloureux. Le seuil de l'audition minimal varie en fonction de la fréquence.

La zone centrale est la zone où la sensibilité de l'oreille est la plus fine.

ordonnée : puissance
abscisse : fréquence

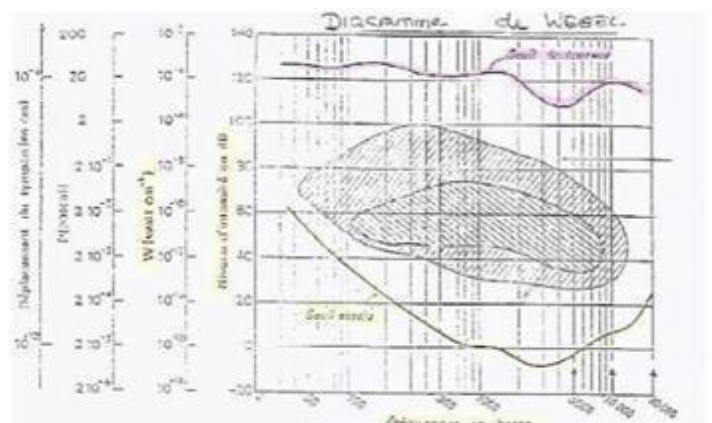


Diagramme américain :

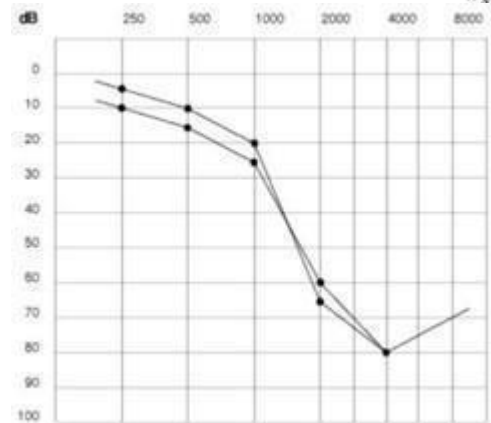
On évalue les performances individuelles par rapport à celles de la population normale afin de déterminer si la perception du patient est conforme à la normale (ici sujet normal).

S'il y a une différence de 30 dB il faudra augmenter de 30 dB (à l'aide d'appareils) pour que le sujet entende normalement. Plus on doit augmenter le niveau sonore pour une fréquence donnée plus on s'éloigne d'un patient normal.

$$L_N = 10 \log\left(\frac{W_N}{W_0}\right)$$

$$L_{sujet} = 10 \log\left(\frac{W_{sujet}}{W_0}\right)$$

$$L_{sujet} - L_N = 10 \log\left(\frac{W_{sujet}}{W_N}\right)$$

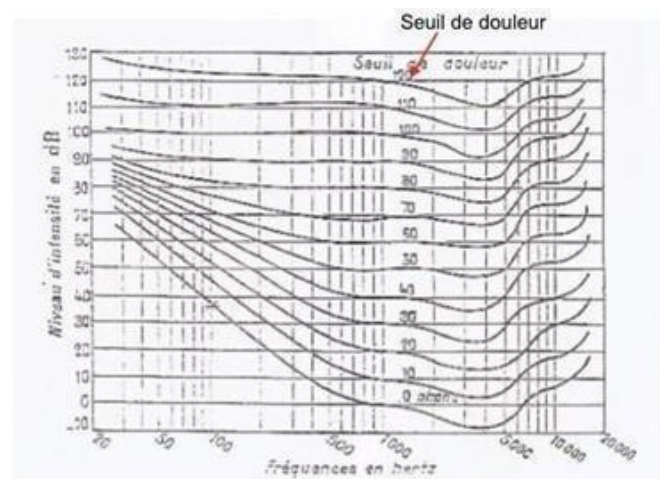


3) Seuil différentiel de sonie

Le seuil différentiel de sonie correspond à la différence minimale de puissance surfacique nécessaire entre 2 sons émis successivement afin que l'oreille les perçoive comme différents (augmentation de puissance). Donne l'impression d'avoir un son fort ou faible.

Le phone correspond à une unité particulière de sensation sonore (liée la puissance et la fréquence) défini par rapport à un son pur de 1000 Hz.

Courbe d'isophonie (courbe de sensation) : En fonction de la fréquence sonore, on aura besoin de puissances ± élevées pour avoir la même sensation au niveau de l'oreille.



C) Timbre

Le timbre est la qualité physiologique qui permet de reconnaître 2 sons de même hauteur et de même sonie (même puissance) mais émis par 2 instruments différents.

- Son pur : terne et sans timbre
- Son complexe : timbre lié la richesse en harmonique

Harmoniques : multiples de la fréquence de base.

En plus du spectre d'amplitude interviennent les transitoires qui correspondent à l'attaque et à l'extinction du son.

D) Autres phénomènes subjectif de l'audition

1) Sons subjectifs

Les sons subjectifs sont liés aux distorsions produites par l'oreille (notamment de l'oreille externe).

Exemples : Perception d'harmoniques inexistantes lors de sons puissants et perception de sons supplémentaires f_1-f_2 et f_1+f_2 dans le cas de 2 sons de fréquences f_1 et f_2 .

2) Fatigue auditive

La fatigue auditive survient après l'audition d'un son intense et répété. C'est une surdité transitoire et sélective (+++ dans le domaine des aigus) qui nécessite une récupération plus ou moins longue et complète (en fonction du traumatisme sonore).

Fatigue est causée par des sons graves (car intenses), et cela a pour conséquence qu'on ait plus de mal à entendre les sons aigus après.

Exemple : Sortie de concert.

3) Orientation auditive

L'orientation auditive est la difficulté plus ou moins importante à déterminer d'où provient le son en fonction de l'axe. Elle prend en compte les deux oreilles.

- Gauche/droite : facile (degrés)
- Devant/derrière: plus difficile (dizaine de degrés)

L'orientation auditive repose sur 2 phénomènes :

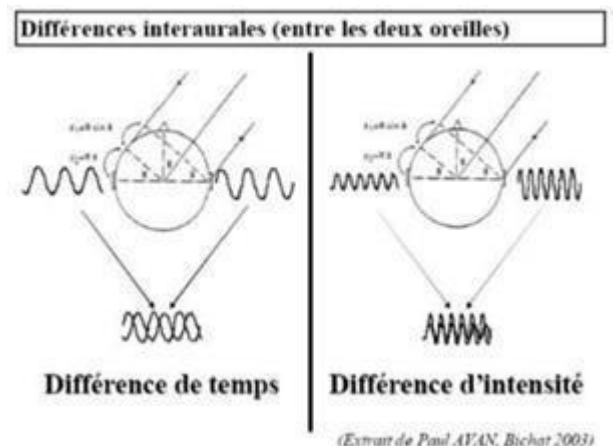
- La différence de temps interaural (ITD)
- La différence d'intensité interaural (IID)

Différence de temps interaural (ITD)

C'est la différence de temps pour que le son arrive à l'oreille.

La localisation des sons dépend de la différence temporelle d'arrivée de l'onde sonore aux deux oreilles (un son issu de la droite atteint plus rapidement l'oreille droite).

L'ITD s'observe quelle que soit la fréquence.



ITD maximale = source approximativement localisée d'un seul côté et égale à la distance entre les deux oreilles divisée par la célérité du son (0, 673m/s chez l'homme).

ITD = nulle pour une source située de face car on est à équidistance des deux oreilles.

Différence d'intensité interaurale (IID)

Les sons incidents sont diffractés par la tête induisant une différence d'intensité entre les deux oreilles (IID). Cette dernière intervient dans la localisation de la source.

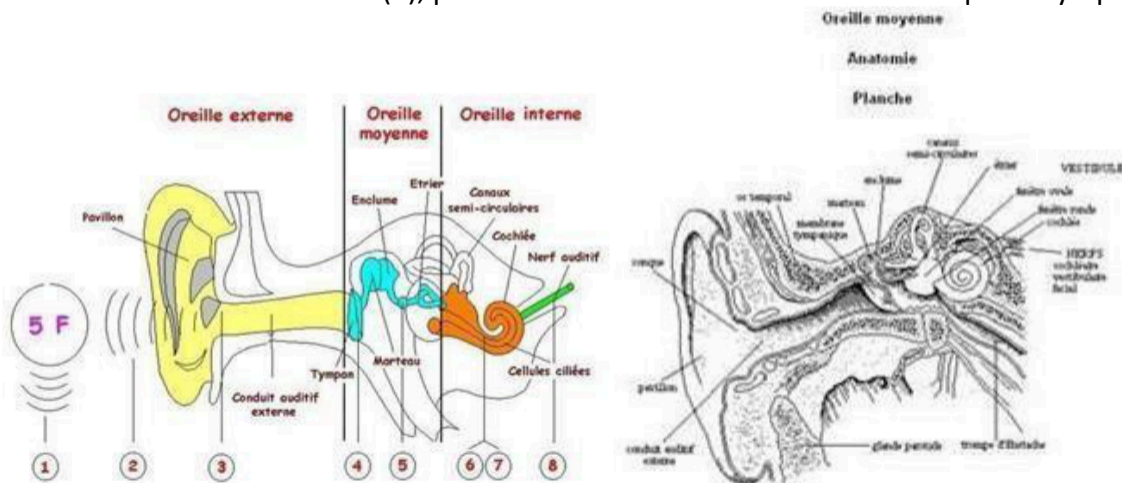
- Dépend de la fréquence.
- Basses fréquences (λ du son \gg diamètre de la tête) : IID inexistant
- Hautes fréquences (λ du son \ll diamètre de la tête) : différences supérieures dB = effet d'ombre de la tête.

III) Phénomènes objectifs de l'audition

Les phénomènes objectifs de l'audition sont tous les phénomènes ayant lieu dans l'oreille pour passer de l'onde sonore (onde mécanique) qui arrive à l'oreille aux messages transmis au cerveau .

A) Rappels anatomiques

L'**oreille externe** est constituée du pavillon qui **capte** les sons (1 et 2) et les concentre dans le conduit auditif externe (3), petit tube fermé à son extrémité interne par le tympan (4).



L'**oreille moyenne** abrite la chaîne des osselets composée du marteau, de l'enclume et de l'étrier (5) qui permet la **transmission mécanique** des vibrations sonores jusqu'à la fenêtre ovale. L'oreille moyenne communique avec le rhinopharynx par la trompe d'Eustache (rôle important dans l'égalisation des pressions).

Important

- Une atteinte de l'oreille externe ou moyenne entraîne une surdité de transmission
- Oreille externe – oreille moyenne → phase de transmission
- Une atteinte de l'oreille interne entraîne une surdité de perception
- Oreille interne → phase de transduction (passage d'un message mécanique à un potentiel d'action)

B) Oreille externe - oreille moyenne

1) Oreille externe (OE)

Composition

Pavillon : Rôle limité chez l'Homme de localisation et de protection de l'oreille moyenne (amortissement du passage de l'air). Il sert à capter et à focaliser le signal sonore.

Conduit Auditif Externe (CAE) : Rôle d'amplification du signal (+10 à 15 dB).

Fonctions

L'oreille externe a différentes fonctions :

- Réception du signal
- Transmission l'onde mécanique de l'OE à l'OM
- Localisation des sources sonores → différences interaurales d'intensité et de phase
- **Amplification du signal** (phénomène de résonance notamment au niveau du CAE de 10 à 15 dB)

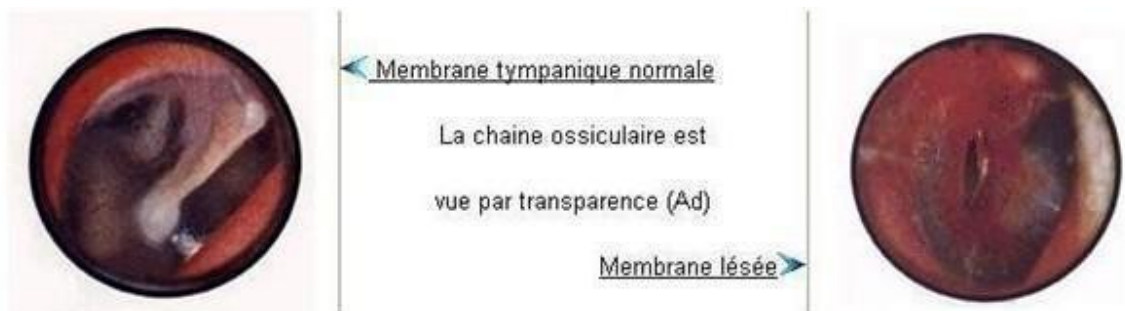
1) Oreille moyenne (OM)

Composition

L'oreille moyenne est constituée de :

- La chaîne tympano-ossiculaire avec:
 - La membrane tympanique mobile (qui répercute les mouvements de l'onde sonore)
 - Les osselets : marteau, enclume, étrier
- La trompe d'Eustache (rôle dans l'équilibration mais vraiment dans l'audition)

Elle communique avec l'oreille interne par les fenêtres ovales (reliée à la rampe vestibulaire) et ronde (communique avec la rampe tympanique).



Fonctions

- **1ère fonction : La transmission OM-OI**

La formule de l'impédance est : $Z = \rho C$

Z: l'impédance

ρ la masse volumique

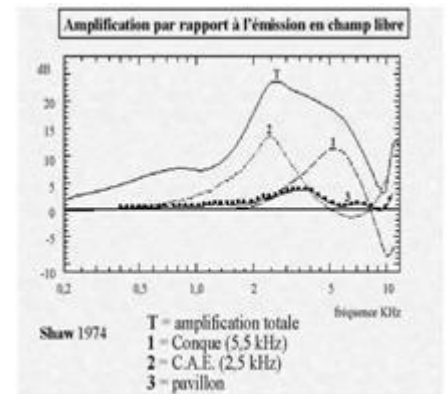
C la célérité du son

Lorsqu'on passe de l'oreille moyenne à l'oreille interne, on passe d'un milieu aérien à un milieu liquidien (on considère interface air/aérien malgré les osselets, d'après le prof).

La différence d'impédance est **importante**. L'impédance de l'air ($Z_1 = 400 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) est bien plus faible que l'impédance de l'eau ($Z_2 = 1600 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Celle-ci augmente donc de l'oreille moyenne à l'oreille interne : $Z_2 \gg Z_1$!!

De OE à OM : $Z_1 = Z_2$ car le milieu reste l'air donc on va avoir une transmission sans réflexion

De OM à OI : $Z_1 \ll Z_2$: on perd de l'énergie car on va avoir un phénomène de réflexion, cela se traduit par une perte de 30 dB



Énergie pour 2 milieux différents :

Lorsqu'on passe d'un milieu à un autre, une partie de l'énergie est réfléchi et une autre est transmise. Plus la différence d'impédance est importante, plus la réflexion est importante.

$$W_i = W_r + W_t$$

$$\frac{W_r}{W_i} = \text{pouvoir.reflexion} = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

$$\frac{W_t}{W_i} = \text{pouvoir.transmission} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

$Z_1 = Z_2$, énergie transmise en totalité

$Z_1 \ll Z_2$ ou inversement, énergie réfléchi en quasi totalité

Et

$$\frac{W_t}{W_i} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \approx \frac{4Z_1Z_2}{Z_2^2} = \frac{4Z_1}{Z_2}$$

On passe d'un milieu aérien à un milieu liquidien

$$Z_1 \text{ air} = 400 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

$$Z_2 \text{ eau} = 1600.10^3 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1} \quad Z_1 \ll Z_2$$

Quantité de signal transmis:

$$t = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} = \frac{4Z_1}{Z_2} = 10^{-3}$$

$$10 \log \frac{W_{eau}}{W_{air}} = 10 \log 10^{-3} = -30 \text{ dB}$$

Quand le son passe du milieu aérien (OM) au milieu liquidien (OI), seulement 1 millième de l'énergie qui arrive à l'interface est transmise, le reste est totalement réfléchi. Ce qui correspond à une perte de 30dB lors du passage de l'OM à l'OI.

- 2ème fonction : Adaptateur d'impédance

Il existe deux mécanismes d'adaptation de l'impédance :

- Un mécanisme amplificateur de pression

Au niveau de l'oreille moyenne sont présentes deux surfaces :

- La surface de la fenêtre ovale, sur laquelle est fixée la plaque de l'étrier :

$$A_2 : 3,2 \text{ mm}^2$$

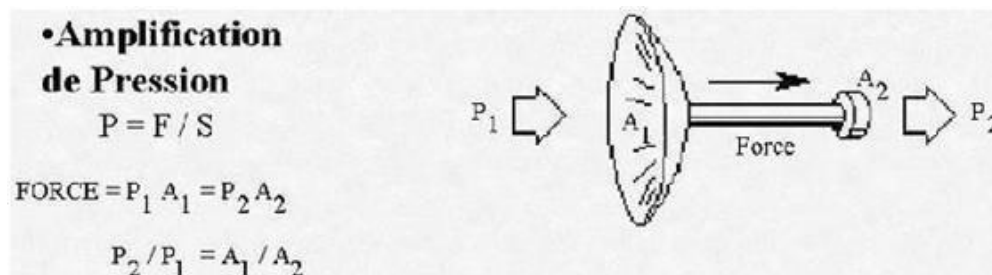
- La surface de la membrane tympanique, solidaire du marteau : **A1 = 55 à 85 mm²**

La force F exercée sur la membrane tympanique par l'action de la pression acoustique P1 arrivant sur celle-ci est : $F = P_1 A_1$.

Cette force est transmise à la fenêtre ovale sur laquelle s'exerce une pression P2 telle que la pression est augmentée d'un facteur $A_1/A_2 \approx 15$.

Cette amplification d'environ 15 fois la pression d'entrée constitue l'action prépondérante de l'adaptation d'impédance ++ (si on appuie avec la même force sur une surface qui est très faible, la pression va être beaucoup plus forte que si on a une surface qui est plus grande).

→ Répartir l'ensemble des forces d'une grande surface sur une petite surface.



- **Un mécanisme amplificateur de force**

Le bras du marteau, de longueur L1 est plus long que celui de l'enclume, de longueur L2. Par rapport au point d'ancrage entre ces 2 osselets, le couple s'exerçant est :

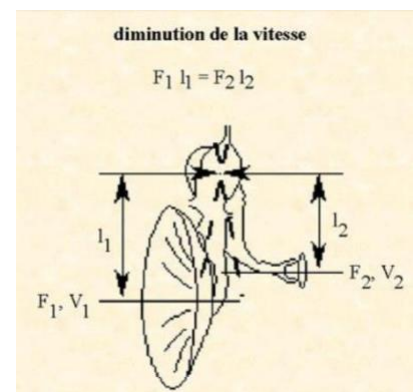
$$F_1 L_1 = F_2 L_2$$

soit

$$F_2 = F_1 \frac{L_1}{L_2} = 1.3 F_1$$

Le jeu de levier de la chaîne ossiculaire entraîne une augmentation de la force, multipliée par 1,3.

Le manche du marteau est plus grand que le bras de l'enclume donc on va gagner en force au niveau de l'enclume puis au niveau de l'étrier ce qui va amplifier le signal.



Al'équilibre :

La pression est multipliée par 18 dans l'OM avant d'arriver au niveau de la fenêtre ovale soit une amplification de 25 dB.

Cela permettra ainsi la compensation de la perte liée au passage de l'air l'eau liée la différence d'impédance des milieux.

$$\frac{\text{Surface}_{\text{tympan}}}{\text{Surface}_{\text{fenetreovale}}} = 15$$

$$\frac{R_T}{R_{fo}} = 1.3$$

$$P_T * S_T * R_T = P_{fo} * S_{fo} * R_{fo}$$

$$\frac{P_{fo}}{P_T} = \frac{S_T}{S_{fo}} * \frac{R_T}{R_{fo}} = 18$$

Si pathologie : perte de cette compensation

- **3ème fonction : protection de l'OI (réflexes stapédien et muscle tenseur du tympan)**

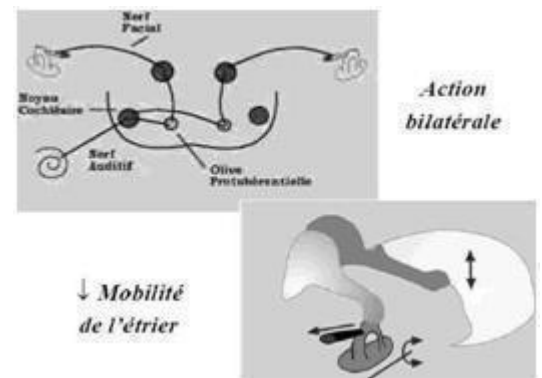
Réflexe stapédien (ou acoustico-facial)

Définition : le réflexe stapédien est la contraction réflexe des muscles de l'étrier en réponse à une stimulation sonore intense.

Fonctions : ce réflexe permet de protéger l'OI des sur-stimulations externes et internes et d'éviter de créer des dommages à ce niveau-là : c'est un réflexe de défense. Il permet la réduction de la transmission des sons > 80 dB.

Il permet une augmentation de la dynamique auditive mais avec une efficacité limitée.

- **Fatigabilité** = son efficacité est diminuée pour les sons intenses et/ou continus
- Activation par les sons de basses fréquences (ou graves) = ↓ pour les composantes de fréquence aiguë
- Il possède une latence de 50 ms = l'efficacité ↓ pour les sons impulsionnels. Ce réflexe permet de diminuer la mobilité de la chaîne des osselets.



Tenseur du tympan

Le tenseur du tympan est un petit muscle strié (comme muscle stapédus) qui s'insère sur le marteau. **Il est innervé par le nerf trijumeau (V).**

Sa contraction est induite pas des stimulations intenses pour **réduire la mobilité de la membrane tympanique et ainsi diminuer la transmission au niveau de l'OI pour la protéger.**

C) Oreille interne (OI)

1) Composition

L'oreille interne est composée de 2 organes sensoriels :

- Un organe de l'équilibre : les 3 canaux semi circulaires et le vestibule.
- Un organe de l'audition : la cochlée (= limaçon)

a) Anatomie de la cochlée

C'est un tube enroulé sur lui-même (comme une coquille d'escargot) de 35 mm de longueur, 2 mm de diamètre et qui fait 2 tours $\frac{3}{4}$ de spires.

+ Au centre, un axe creux contenant le nerf auditif nommé **columelle**.

La cochlée est composée de la **rampe tympanique (RT)**, de la **rampe vestibulaire (RV)** et du **canal cochléaire**.

b) Canal cochléaire

Il est séparé de la rampe tympanique par la membrane basilaire (insérée sur le bord libre de la lame osseuse spirale) et de la rampe vestibulaire par la membrane de Reissner, attachée sur la strie vasculaire, tendue obliquement vers la lame spirale.

La membrane basilaire a un rôle important car l'organe de Corti se situe dessus

- Les RV et RT contiennent la périlymphe (proche des liquides extra-cellulaires).
- Le canal cochléaire contient l'endolymphe

Péri et endolymphe ne sont ni sécrétées ni réabsorbées. Leur composition chimique (sensible) est due à des phénomènes de transports ioniques locaux. Les volumes impliqués sont très faibles (OI = 225 μL ; RT= 44 μL ; RV = 31.5 μL ; CC = 7,7 μL). Certains médicaments peuvent altérer les cellules à l'origine de ces échanges ioniques et donc altérer l'audition.

Le canal cochléaire contient l'organe de Corti dont les cellules ciliées internes (= CCI) et externes (= CCE) vont assurer :

- L'amplification du signal au niveau des CCE
- Une sélectivité en termes de fréquence
- La transduction de l'énergie mécanique (Pression) en énergie électrique (CCI) → Potentiel d'action du nerf auditif

c) Organe de Corti

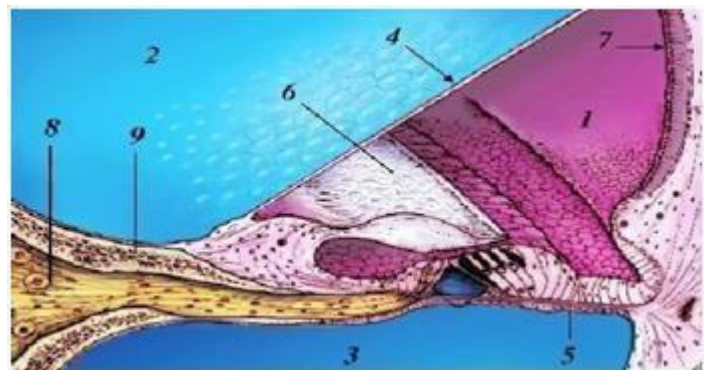
L'organe de Corti est composé de :

- **Cellules ciliées internes** (3 500 cellules), responsables de la transduction mécano-électrique
- **Cellules ciliées externes** (12 000 cellules), responsables du couplage mécanique entre membrane basilaire et membrane tectoriale (située au-dessus des cellules ciliées dont les stéréocils s'insèrent dans la membrane tectoriale).

Ainsi, il y a seulement 16 000 cellules (contre 100 millions de récepteurs pour œil), non renouvelables. C'est donc un organe très fragile → l'atteinte de ces cellules, généralement irréversible, est à l'origine d'une **surdité de perception**.

Pour bien se situer :

Le canal cochléaire (1), contenant l'endolymphe sécrétée par la strie vasculaire (7), est isolé de la rampe vestibulaire (2) par la membrane de Reissner (4). L'organe de Corti est recouvert par la membrane tectoriale (6) flottant dans l'endolymphe ; il repose sur la membrane basilaire (5) au contact de la rampe tympanique (3). La lame spirale osseuse (9) relie l'organe de Corti au ganglion nerveux pour véhiculer le début du message neuronal vers le cerveau (8).



Les stéréocils sont enchâssés dans la membrane tectoriale située au-dessus de l'organe de Corti.

Résumé

L'onde provenant des osselets va arriver au niveau de la fenêtre ovale, elle va être transmise au niveau de la fenêtre vestibulaire. Les fenêtres vestibulaire et tympanique communiquent en haut de la cochlée (→ helicotrema). Il y aura une conduction de la transmission vers la rampe tympanique en dessous puis un mouvement de phase.

d) Membrane basilaire : base de la mécanique cochléaire

La membrane basilaire fait 34 mm de longueur (courte).

Elle prolonge la lame osseuse spirale, et à son bord externe se fixe à la paroi cochléaire par le ligament spiral, très élastique.

Sa largeur augmente progressivement de la base vers l'apex, la lame spirale variant dans le sens inverse, tout comme la taille du canal cochléaire.

Elle a une importance fonctionnelle primordiale, car c'est sur elle que repose l'organe de Corti dont les cellules ciliées internes assurent la **transduction** de la stimulation mécanique en phénomène bioélectrique.

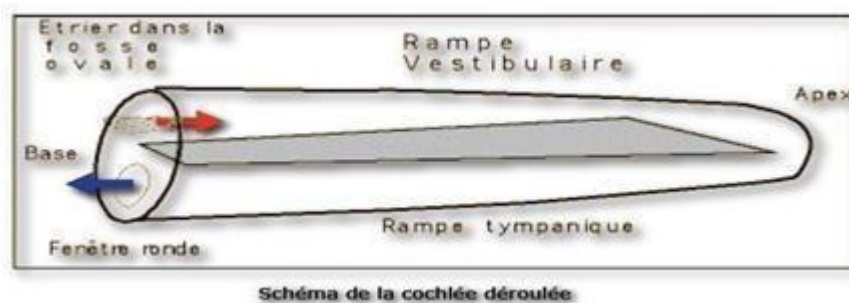
	Base	Apex
Diamètre de la Cochlée	2 mm	1 mm
Largeur de la membrane basilaire	0,01 mm	0,065 mm
Compliance	1	10^5

e) Compliance

C'est l'inverse de la raideur. C'est la capacité à se déformer.

La membrane basilaire est beaucoup plus compliant l'apex qu'à la base. En effet la membrane basilaire est de plus en plus large et donc de plus en plus compliant.

Or, la direction de propagation d'une onde se fait toujours d'un point de raideur élevée, la base, vers un point de raideur plus faible, l'apex, et ne dépend pas de la façon dont les ondes arrivent.

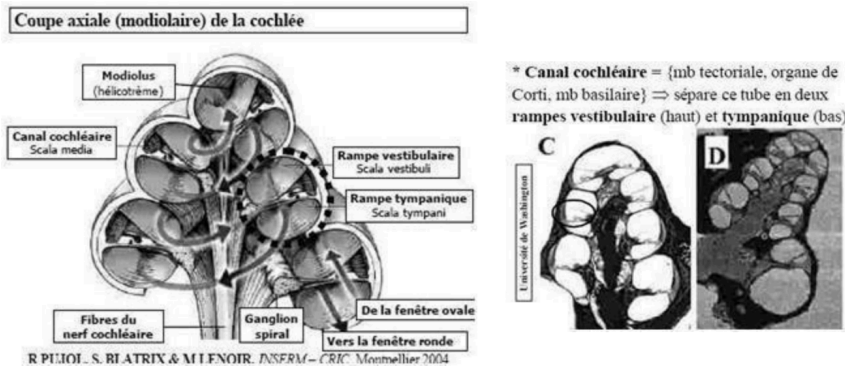


On a au niveau de la flèche rouge l'arrivée de l'onde au niveau de la fenêtre ovale (FO) qui passe dans la rampe vestibulaire puis au niveau de l'hélicotréma, ensuite dans la rampe tympanique et qui ressort par la fenêtre ronde (FR)

→ il y a une onde qui passe et elle va entraîner une vibration au niveau de la membrane basilaire.

Le canal cochléaire se termine du côté apical = Apex par un cul-de-sac qui n'atteint pas le sommet du tube osseux et laisse un passage nommé hélicotréma entre RV et RT.

La Membrane basilaire est complètement compliant donc elle subit les mouvements de pression de manière passive : propagation d'une onde à travers cette membrane.



f) Physiologie de la cochlée

La fenêtre ovale vibre et transmet les vibrations à la périlymphe dans la RV. Comme les liquides sont incompressibles, la fenêtre ronde se déplace dans l'autre sens. On aura donc des mouvements des fenêtres en opposition de phase. Ces mouvements de liquides vont entraîner une déformation de la membrane basilaire (où repose l'organe de Corti).

g) Théorie de la résonance

C'est historiquement la première théorie envisagée par Helmholtz qui proposa comme modèle de fonctionnement de la membrane basilaire (MB) celui des cordes vibrantes.

Théorie des résonateurs cochléaires (Von Helmholtz)

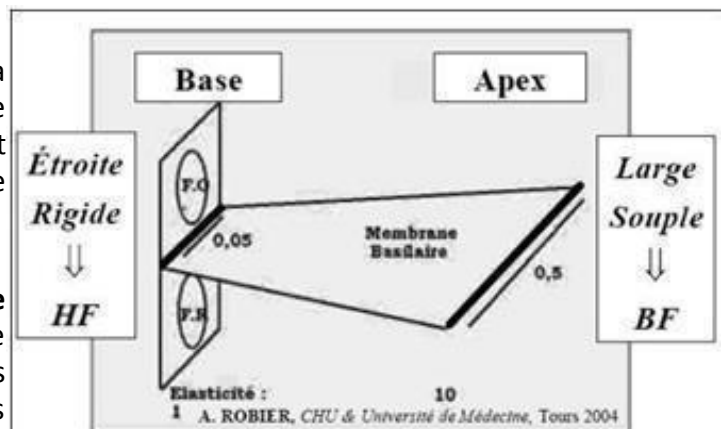
* Hypothèse :
 => **cloison cochléaire** (= organe de Corti + membrane basilaire) composé de "résonateurs" **transversaux**
 - de tension croissante de la base à l'apex
 - "accordés" chacun sur une fréquence précise

h) Théorie de l'onde propagée

Tonotopie passive (Important !)

Von Békésy (Prix nobel en 1961) montra que la membrane basilaire (MB) n'est pas tendue (elle est maintenue par un ligament élastique, elle est donc très souple) et ne peut donc pas être associée à une succession de cordes vibrantes.

→ La membrane Basilaire n'a **pas de vibrations propres** /!\ : ses mouvements ne peuvent être que **passifs** car provoqués par les mouvements des liquides cochléaires eux-mêmes provoqués par la vibration de l'étrier.



⇒ **Support de la TONOTOPIE COCHLÉAIRE**

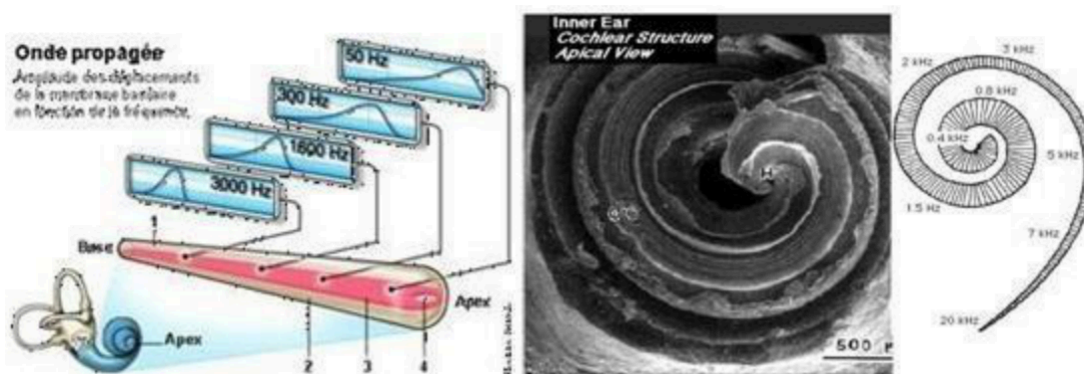
Une vibration de l'étrier va donc provoquer une différence de pression hydraulique entre les deux rampes à l'origine d'une vibration de la membrane basilaire. Puisque du fait de sa structure la membrane basilaire est beaucoup plus rigide à la base qu'au sommet, pour une même pression continue, la déformation au sommet est 105 fois plus grande qu'à la base. Les oscillations de pressions dans la RV se traduisent au niveau de la membrane basilaire par une onde propagée progressant de la base vers l'apex avec une amplitude croissante.

Puis, au-delà d'un maximum, dont la position est fonction de la fréquence de la stimulation, l'onde s'arrête brusquement.

L'amplitude des mouvements de la MB sous l'influence d'une stimulation sonore montre un phénomène de résonance, avec une amplitude de vibration plus grande dans un secteur de la MB qui dépend de la fréquence du son.

Ainsi, pour une fréquence donnée, on va avoir une vibration donnée de la membrane basilaire : pour les fréquences élevées la membrane ne vibrera qu'à la base alors que pour des fréquences basses elle vibrera quasiment jusqu'à l'apex. De plus, en fonction du type de fréquence que l'on aura, il y aura une ondulation particulière de la MB. A chaque endroit de la MB va correspondre une fréquence donnée.

Von Bekesy établit ainsi une véritable carte de la distribution des maximums de fréquence sur la membrane basilaire.



2) Organe de Corti

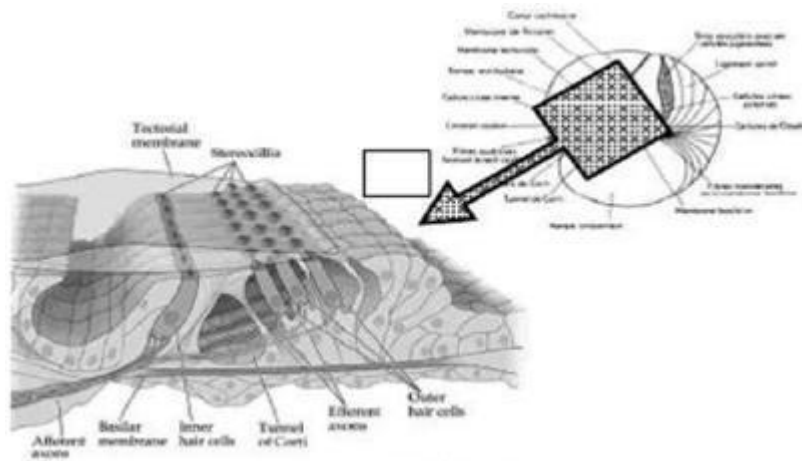
Il est fixé sur la membrane basilaire et est composé de 16 000 cellules ciliées avec :

- **3 rangées de cellules ciliées externes (CCE environ 12 500) qui possèdent des propriétés contractiles.**
- **1 rangée de cellules ciliées internes (CCI environ 3 500) qui assure la transduction mécano-neurale (passage d'une information mécanique séquentielle en un message électrique).**

C'est donc à partir des CCI que va partir le nerf auditif.

Nerf Auditif = 35 000 fibres auditives afférentes (10 fibres par cellule ciliée interne (type I) et 1 fibre pour 20 cellules ciliée externe (type II)).

Chacune de ces cellules possèdent des stéréocils à leur pôle apical qui sont fixées dans la membrane tectoriale.



Le fonctionnement de l'organe de Corti se résume en 5 phases :

- ① La vibration sonore est transmise dans la périlympe et fait onduler la membrane basilaire.
- ② Ainsi, le mouvement de la membrane entraîne un mouvement des CCE et leurs stéréocils, implantés dans la membrane tectoriale vont être déplacés horizontalement. Ce mouvement de cisaillement des stéréocils induit une dépolarisation des CCE quand le déplacement se fait vers l'extérieur.
- ③ Les CCE dépolarisées se contractent (électromotilité) amplifiant les vibrations initiales de la membrane basilaire sur une zone caractéristique (rôle d'amplification du mouvement et de filtre sélectif permettant à l'organe de Corti de se cibler sur la zone de fréquences où il s'insère).
- ④ Les CCI sont excitées grâce au mouvement (amplifiés) de la membrane tectoriale, qui entraîne avec elle les stéréocils des CCI, provoquant la dépolarisation de celles-ci.
- ⑤ La dépolarisation active la synapse entre les CCI et les différentes fibres du nerf auditif, créant un signal électrique au niveau du nerf, qui est envoyé au cerveau.

3) Fonction de l'oreille interne

Rôle de transduction du signal auditif :

La transduction du signal auditif est la transformation des vibrations mécaniques en impulsions électriques transportables par le nerf auditif jusqu'au cerveau.

Il y a deux mécanismes différents (qui se complètent) :

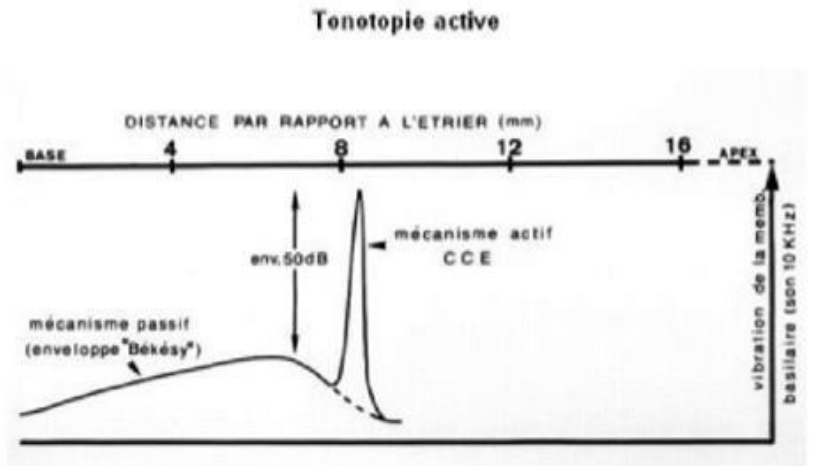
- ① Un mécanisme hydromécanique complètement passif : c'est la déformation de la membrane basilaire en fonction de la fréquence du stimulus, qui ondule de façon très caractéristique dépendant de la fréquence de l'onde initiale (tonotopie cochléaire passive).
- ② Des micro-mécanismes actifs au niveau cochléaire au niveau des cellules ciliées (pour les sons de moins de 50 dB). Les contractions des CCE amplifient les déplacements relatifs de l'organe de Corti par rapport à la membrane tectoriale, base de la sensibilité auditive ainsi que de la discrimination fréquentielle fine.

Le résultat de ces deux mécanismes étant une transduction mécano-neurale du signal par les CCI (activation des CCI et influx nerveux transmis aux fibres auditives).

Exemple :

En haut : la distance de la membrane basilaire par rapport à la base et à l'apex.

Un son pur de 10 kHz à la base va entraîner un mécanisme passif, dû au phénomène de dépression dans la périlymphe au niveau des rampes tympaniques et vestibulaires (on a un mouvement ample mais qui s'arrête à une fréquence caractéristique = 10 kHz).



Le mécanisme actif qui est la contraction des CCE va amplifier ce phénomène, on aura donc un mouvement beaucoup plus important dans cette zone caractéristique des 10 kHz.

Ceci accorde les vibrations sur une zone très étroite de l'organe de Corti, qui correspond à la zone de fréquence qui nous intéresse, permettant une bonne tonotopie (sélectivité de fréquence).

Dans une cochlée saine, le couplage mécanique des CCE avec la membrane tectoriale et la membrane basilaire, permet d'amplifier la stimulation sonore par un phénomène actif. Ainsi amplifiée, l'amplitude de la vibration est transmise aux CCI capables de traduire l'excitation (entrée de K+) en un message nerveux (glutamate). Une lésion (ou même une fatigue) des CCE entraîne une perte du phénomène actif d'amplification et donc une augmentation du seuil de détection de 40-50 dB. On a donc une perte d'audition plus ou moins importante.

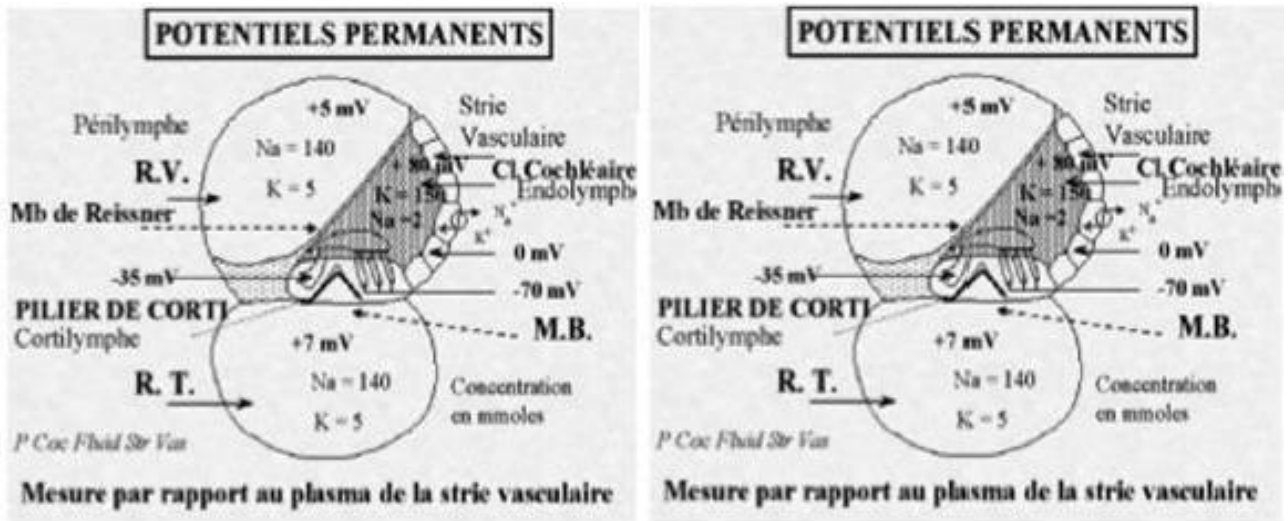
Rôle de mécanotransduction- (- important):

C'est l'étude des potentiels de repos et de stimulation.

a) Potentiel de repos

Potentiel de repos : potentiel de membrane classique lié aux différences de concentration ionique des milieux. Ici on a : les compositions ne sont pas à connaître par cœur, il faut savoir que les concentrations sont très particulières (d'où l'impact de certains médicaments sur l'audition).

Pérylymphe	Endolymphe
Na = 140	Na = 1
K = 5	K = 150 (produit par la strie vasculaire)
P = 1 (g/L)	P = 0,3 (g/L)
ddp = 0 mV	ddp = +80 mV



Dans les CCI ou CCE, la différence de potentiel est négative.

La différence de potentiel de repos entre les cellules ciliées internes et l'endolymphe est de l'ordre de -160mV.

b) Potentiel de stimulation

La flexion des stéréocils est l'origine de la mécano-transduction car elle va ouvrir les canaux et faire entrer le potassium dans les cellules, et donc entraîner une inversion des ddp et une dépolarisation.

Chaque cellule ciliée contient 100 stéréocils.

Les différences de pression hydraulique induisent un cisaillement de la membrane tectoriale responsable des phénomènes de dépolarisation et hyperpolarisation.

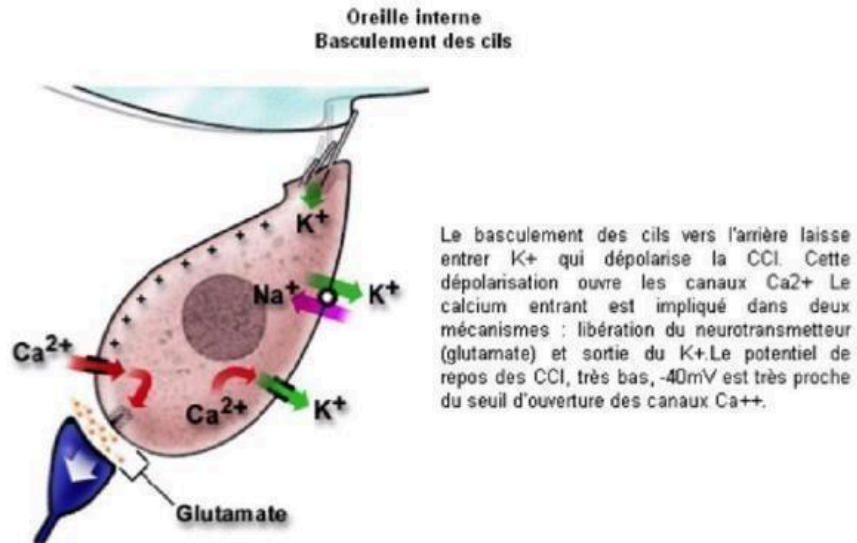
- Au niveau des CCI la dépolarisation entraînera une augmentation de la décharge dans les fibres afférentes du nerf auditif proportionnelle à l'amplitude de flexion (plus les stéréocils seront basculés longtemps, plus on aura un message important dans la fibre afférente).
- Au niveau des CCE la dépolarisation entraînera un changement de longueur de la cellule (contraction des cellules) à la même fréquence que celle de son stimulant.

c) Libération du neurotransmetteur

Une déflexion de moins d'1nm suffit à ouvrir les canaux K⁺.

C'est cet influx de potassium en grande quantité dans les cellules qui va être responsable des variations des potentiels membranaires et donc qui entraînera :

- Au niveau des CCE une contraction des cellules.
- Au niveau des CCI le relargage du neurotransmetteur (glutamate) dans la synapse.



d) Innervation

Deux types principaux de fibres innervant la cochlée :

- Les fibres afférentes transmettent l'influx nerveux vers les différents centres supérieurs et le cortex.
- Les fibres efférentes, envoient à partir du Complexe de l'Olive Supérieure des influx aux cellules ciliées.

D) Résumé

Le rôle de l'oreille interne est de transformer une onde mécanique en signal électrique. La pression acoustique exercée sur la fenêtre ovale puis dans l'ensemble de la périlymphe de la cochlée va faire vibrer la membrane basilaire, et donc un mouvement des cellules de l'organe de Corti. Ceci va conduire à un cisaillement des cellules ciliées au niveau de la membrane tectoriale, ce qui les excite et entraîne une dépolarisation (ouverture des canaux ioniques).

Potentiels de repos et de stimulation des cellules ciliées :

- Potentiel permanent secondaire aux différences de concentrations ioniques entre l'endolymphe et les cellules ciliées $-180mV$.
- Potentiel de stimulation (potentiel de récepteur) : le potentiel oscille de la même façon que la pression.

Différences avec le potentiel d'action : pas de latence, pas de seuil, l'amplitude est proportionnelle et l'intensité des niveaux sonores modérée. Plus on a un son important, plus les stéréocils vont être inclinés pendant longtemps donc rapport entre intensité du son et mouvement des stéréocils.

Codage des PA peut être en fréquence et en intensité :

- Selon les cellules ciliées excitées, on connaît la fréquence du signal (**cellules apicales de la membrane basilaire basses fréquences, cellules basales hautes**

fréquences). Chaque endroit de la membrane basale va correspondre à une fréquence donnée.

- Selon la cadence des PA on définit l'intensité du signal (plus l'intensité du son est importante, plus la cellule ciliée et les stéréocils vont bouger, plus le potentiel de stimulation va être important et donc plus la cadence des PA sera élevée).

C'est donc en fonction de l'endroit duquel vient le PA que l'on connaît la fréquence et c'est en fonction du nombre et de la cadence des PA dans ces cellules que l'on connaît l'intensité.

IV) Rappels importants du cours

L'onde sonore est une **onde mécanique**. Elle se propage dans la matière par une succession de compressions/ décompressions de celle-ci.

Comment le cerveau intègre-t-il cette onde mécanique en message électrique ?

L'appareil auditif se compose de plusieurs éléments :

- L'oreille externe (OE) : elle reçoit et transmet l'onde mécanique à l'oreille moyenne. Elle produit, par un phénomène de résonance, une amplification de 20dB dans le conduit auditif externe.
- L'oreille moyenne (OM) : composée de la chaîne tympano-ossiculaire elle transmet l'onde mécanique à l'oreille interne.

Elle compense la perte d'intensité (30 dB) due la différence d'impédance entre l'air (OE+OM) et le milieu liquidien de l'OI par une amplification acoustique en phénomènes :

- Rapport des surfaces entre le tympan et la fenêtre ronde : augmentation de la force. ($P = F/S$)
- Effet levier de la chaîne ossiculaire : augmente la transmission de la fenêtre ovale.

Elle a également un rôle de protection grâce au réflexe stapédien (limite la transmission à la fenêtre ovale) et au rôle accessoire du tenseur du tympan.

L'oreille interne (OI) : traduction de l'onde mécanique en message électrique.

La membrane basilaire est de plus en plus large et souple de la base vers l'apex de la cochlée. Selon l'onde qui l'atteint, elle vibre de façon différente. Plus un son est grave, plus la zone de la membrane déplacée se situe près de l'apex.

Les mouvements des fenêtres ronde et ovale sont en opposition de phase. Cela fait onduler la membrane basilaire. C'est un mécanisme complètement **passif**.

Les vibrations de la membrane basilaire mettent en mouvement des cellules ciliées externes (CCE) implantées dans la membrane tectoriale. Les CCE se dépolarisent et se contractent : amplification de la vibration initiale. Les CCE sont sélectives sur la fréquence vers la fin de la progression de l'onde.

Ceci provoque la dépolarisation des cellules ciliées internes (CCI) qui forment le potentiel d'action circulant dans le nerf auditif.

Le codage en fréquence (tonie) est fonction de la zone de la membrane basilaire stimulée. Le codage en intensité (sonie) est fonction de la cadence des PA dans le nerf auditif.

V) Types de surdité

Rappels :

Surdité de **transmission** : atteinte de l'OE ou OM donc de l'appareil de transmission du son.

Surdité de **perception** : atteinte de l'OI ou de la voie nerveuse auditive en aval (c'est une surdité neurosensorielle).

A l'aide d'un diapason et de la clinique, nous sommes censés savoir si c'est une surdité de transmission (OE, OM) ou de perception (OI).

Note : Le 1er élément clinique (otoscopie) à vérifier est l'atteinte du CAE.

A) Surdité de transmission

1) Atteinte de l'oreille externe

Surdité de transmission = donc transmission de l'onde mécanique de l'extérieur donc du tympan vers la fenêtre ovale.

Le pavillon (rarement) : tumeurs, infections, hématomes après traumatisme, l'air ne peut pas passer.

Le CAE peut-être obstrué par un bouchon de cérumen ou un corps étranger qui bloque le passage de l'onde sonore. Il peut être infecté localement (furoncle) ou de façon diffuse (otite externe = gonflement diffus du CAE).

Cela entraîne une altération de la transmission du son.

2) Atteinte de l'oreille moyenne

Infections ou otites secondaires à une infection rhinopharyngée propagée par la trompe auditive, pouvant se compliquer d'une ostéite (atteinte du rocher) avec lésion importante des osselets atteinte du tympan.

Troubles de la ventilation telle que la catarrhe tubaire : la trompe auditive s'obstrue et un vide relatif s'établit dans la caisse du tympan par différence de pression. Comme ce que vous avez lorsque vous êtes en avion, faites de la plongée, etc, sauf qu'ici la trompe ne permet pas de corriger. Se corrige par l'insufflation.

Les lésions chroniques tympano-ossiculaires telles que l'otospongiose due à une ankylose de la platine de l'étrier dans la fenêtre ovale par une formation osseuse d'origine indéterminée (dépôts au niveau de l'étrier et la fenêtre ovale). La platine de l'étrier transmet mal l'information mécanique de la chaîne ossiculaire la fenêtre ovale. Cette maladie est opérable pour libérer l'étrier de l'ankylose.

Traitement :

Il peut être médical (ex : otites), microchirurgical (ex : libération de l'ankylose dans l'otospongiose) ou constitué par la pose de prothèses osseuses.

B) Surdité de perception

Atteinte de l'oreille interne, surdité neurosensorielle.

1) Traumatismes

- Les fractures du rocher avec destruction labyrinthique.
- Les traumatismes sonores causés par un bruit violent ou qui sont la conséquence de bruits répétés d'origine souvent professionnelle (sup. 100 dB). Le traitement est essentiellement prophylactique.
- L'excitotoxicité du glutamate (neurotransmetteur entre CCI et le nerf) sur les CCI est souvent responsable de l'hypoacousie et des acouphènes consécutifs à ces traumatismes. Ces lésions sont peu appareillables aujourd'hui. Si il y a une atteinte des CCI, on ne pourra pas forcément la corriger.
- Les barotraumatismes (aviation, plongée).

2) Toxi-infections

- Aminoglycosides (ATB), Aspirine (rôle sur l'électromobilité), intoxication au plomb, antitumoraux (cisplatine, carboplatine), diurétiques à fortes doses.
- Séquelles de maladies infectieuses : oreillons, méningites.
- Atteinte congénitale (rubéole)

Ces atteintes touchent généralement les cellules ciliées. Lorsque seules les CCE sont touchées, il sera envisageable de procéder à une amplification par les prothèses électroniques ou numériques (car transduction du message OK).

3) Causes de surdité de perception chez l'enfant (exemples)

LES SURDITES DE PERCEPTION CHEZ L'ENFANT		SURDITÉ DE L'ENFANT		
ATTEINTE DE L'OREILLE INTERNE ET DES V.A.A.		Perte en dB	Conséquences	Morbidité
• PRÉNATALES	diagnostic: otoémissions	20 - 40	Défaut prononciation des consonnes. G�ne scolaire.	3 %
HÉRÉDITAIRES 40 %		Légère	Langage tardif et imparfait.	
EMBRYO - FOETOPATHIES: RUBÉOLE 45 % - TOXOPLASMOSE		40 - 70	Confusions alphabet.	
ANTIBIOTIQUES - CYTOTOXIQUES		Moyenne		
• NÉONATALES	diagnostic: otoémissions	70 - 90	Identification des bruits	1 %
SOUFFRANCE FOETALE AIGUE DU PRÉMATURÉ		Sévère	Perception voix forte	
INCOMPATIBILITÉS FOETOMATERNELLES		> 90	Aucune perception de la parole.	
• POST NATALES		Profonde		
MÉNINGITES BACTÉRIENNES				

Acquis  à la naissance ou en p rinal : rubéole, toxoplasmose

4) Troubles liquidiens

La Maladie de Menière est due à une altération chimique ou pressionnelle (hypertension) des liquides de l'oreille interne. Elle est associée à des troubles de l'équilibre (vertiges) et correspond une atteinte endocochléaire (phénomène de recrutement).

5) Presbyacousie

= surdité de sénescence

La courbe de conduction descend plus rapidement pour les sons aigus que pour les sons graves.

Elle explique la mauvaise intelligibilité, surtout des mots mal articulés, car le déficit sur les aigus trouble l'audition des consonnes.

Elle correspond une **diminution de l'amplification par les CCE** et peut selon les cas (âge du sujet, degré d'atteinte) être appareillée par des prothèses numériques ou la pose d'un implant. Atteinte préférentielle des sons aigus.

6) Tumeurs

Neurinome du nerf auditif comprimant les organes voisins. L'exérèse peut se faire en cas de diagnostic précoce.

B) Exemples

Surdité de transmission :

- Intégrité de l'OI respectée, absence de perte par conduction osseuse
- Perte pour toutes les fréquences par voie aérienne, ++ grave

Surdité de perception :

- Perte identique par voie aérienne et osseuse, ++aigus (vieillard, aminoside (ATB), traumatisme, infection)

Surdité mixte : perte par voie aérienne > voie osseuse

Remarque : Il y a peu de pathologies liées à la membrane basilaire sauf en cas de traumatismes où il y aura alors une surdité de perception mais cela reste plus rare que les pathologies touchant les cellules ciliées externes et internes.

VI) Explorations de la fonction auditive

- Otoscopie (miroir de Clat)
- Acoumétrie : phonique (syllabes chuchotées) ou instrumentales (diapasons de diverses fréquences en CA ou CA)
- Audiométrie : vocale, tonale liminaire, tonale supraliminaire
- Impédancemétrie
- Potentiels évoqués auditifs
- Otoémissions

1 . Diagnostiquer => 2 . Evaluer => 3 . Surveiller

Étude conduction aérienne (CA) : étude pour différentes fréquences (de 125 à 10 000 Hz en commençant à 1000 Hz haute frq) de chaque oreille.

Etude conduction osseuse (CO) : à l'aide d'un vibreur ou d'un diapason sur la mastoïde (plage de fréquence moins étendue de 250 à 6 000 Hz assourdissement indispensable de l'oreille controlatérale car 10 dB d'écart suffisent à l'oreille controlatérale à percevoir le son) => Court-circuit OE et OM afin de bien étudier l'OI.

Note : Il a été très vite sur les notions qui suivent, il nous a dit qu'elles seront vues de manière plus détaillée lors d'autres cours. Ce qui est important à retenir sont les différentes étapes de la progression de l'onde et donc les différentes surdités liées.

A) Acoumétrie (a sauté cette partie)

Conditions expérimentales :

- Pièce silencieuse
- Tester d'abord l'oreille saine puis celle malade
- Tester d'abord les hautes fréquences
- Assourdir l'oreille non testée

Plusieurs méthodes :

- Etude de la perception aérienne : (simple, rapide, mais peu précise) : Faire répéter au sujet, dans un local silencieux, des mots émis à voix +/- forte dans l'axe du CAE l'autre côté étant obstrué.
- Diapason (utilisé en pratique +++): détermination des temps de perception osseux et aérien (CA=3 CO)

1) Epreuve de Rinne

Elle consiste à comparer la conduction aérienne (CA) et la conduction osseuse (CO).

Le diapason est mis en vibration. Son pied est d'abord appliqué sur la mastoïde (=CO). Lorsqu'il n'est plus entendu au niveau de la mastoïde, le diapason est présenté à 10 cm du pavillon (=CA). Il doit normalement être entendu car la conduction aérienne est plus longue que la conduction osseuse.

Normalement, le son est mieux entendu et plus longtemps par la voie aérienne (transmission normale).

Sujet normal	Surdité de perception	Surdité de transmission
Le son est réentendu	Le son est réentendu	Le son n'est pas réentendu
CA et CO normales	CA et CO diminuées de la même manière	CA diminuée et CO normale
CA>CO	CA>CO	CA<CO
Rinne positif	Rinne positif	Rinne négatif

- **Chez un patient sain** : Lorsqu'on pose le diapason sur son mastoïde, il perçoit le son qui diminue avec la diminution de la vibration et ce, jusqu'à disparaître (c'est le seuil auditif en conduction osseuse).

A la fin de son temps de perception osseuse, il n'entend plus. Si à ce moment on place le diapason devant le pavillon, le sujet entend de nouveau car en conduction aérienne l'oreille moyenne amplifie le son : on est dans le temps de conduction aérien ($CA = 3CO$)

- CA et CO normales
- La CA reste donc $> CO$
- Rapport $CA/CO = 3$
- Rinne positif

- **Surdité de perception** (atteinte de l'oreille interne): Lorsqu'on pose le diapason sur sa mastoïde il perçoit le son qui diminue avec la diminution de la vibration mais moins longtemps et ce, jusqu'à disparaître.

A la fin de son temps de perception osseuse, il n'entend plus. Si à ce moment on place le diapason devant le pavillon, le sujet entend de nouveau mais moins longtemps, car en conduction aérienne l'oreille moyenne amplifie quand même le son.

- la CA et la CO sont diminuées
- La CA reste donc $> CO$
- Rapport $CA/CO = 3$, conservé.
- Rinne positif

- **Surdité de transmission** (atteinte de l'oreille externe ou de l'oreille moyenne) : Lorsqu'on pose le diapason sur sa mastoïde, il perçoit le son qui diminue avec la diminution de la vibration et ce, jusqu'à disparaître.

A la fin de son temps de perception osseuse, il n'entend plus. Si à ce moment on place le diapason devant le pavillon,

le sujet n'entend toujours pas car en conduction aérienne l'oreille moyenne ne peut plus amplifier le son.

- La CA est diminuée, la CO est normale
- La CO devient $> CA$
- Rapport $CA/CO < 3$.
- Rinne négatif.

Si le son est mieux perçu au niveau de la mastoïde, alors le Rinne est négatif.

A l'inverse, si le son est mieux perçu au niveau du CAE, alors le Rinne est positif.

2) Test de Weber

Teste l'effet de la latéralisation en conduction osseuse (recherche d'une atteinte asymétrique). Un diapason en vibration est placé sur le front du sujet qui perçoit une vibration sonore. On demande ensuite au sujet, à quel endroit il perçoit le plus le son.

Sujet normal	Surdité de perception	Surdité de transmission
--------------	-----------------------	-------------------------

Son perçu par les 2 oreilles	Weber latéralisé du côté sain	Weber latéralisé du côté atteint
------------------------------	-------------------------------	----------------------------------

- **Sujet normal** : Normalement on entend le son au milieu. Les deux oreilles perçoivent la même intensité sonore.
- **Surdité de perception** : S'il existe une hypoacousie due une atteinte de la perception neurosensorielle d'une oreille, le son sera mieux entendu par le côté sain. On dit qu'il y a une latéralisation du côté sain.
- **Surdité de transmission** : Au contraire dans le cas d'une surdité de transmission le son sera mieux entendu par le côté atteint. On dit qu'il y a une latéralisation du côté atteint. (On peut le comprendre en pensant que le côté atteint est habitué à fournir plus d'effort pour entendre du fait de sa surdité de transmission = phénomène de compensation)

Exemple :

- Surdité de perception à droite : meilleure entente du son à gauche.
- Surdité de transmission à droite : meilleure entente du son à droite.

3) Conditions expérimentales

- Pièce silencieuse
- Tester d'abord l'oreille saine puis l'oreille malade
- Tester d'abord les hautes fréquences
- Assourdir l'oreille non testée

B) Audiométrie

1) Audiométrie vocale : test d'intelligibilité

Elle est aussi appelée test d'intelligibilité.

Le patient répète des mots qu'il vient d'entendre par groupe de 10, avec pour chaque groupe des niveaux sonores différents.

On définit le pourcentage d'intelligibilité comme le rapport :

Nombre de mots compris / Nombre de mots prononcés par manipulateur.

Le manipulateur commence à voix haute (90-100 dB) et diminue progressivement d'intensité. Ce test peut se faire en audition

binaurale ou unilatérale (on teste une oreille par rapport à l'autre).

On trace alors un graphisme représentant la variation du



pourcentage d'intelligibilité en fonction des niveaux sonores de la voix qui a servi aux essais

Normalement, il y a une intelligibilité de 100% pour une intensité allant de 20 à 100 dB. Cela donne une courbe en S allongée.

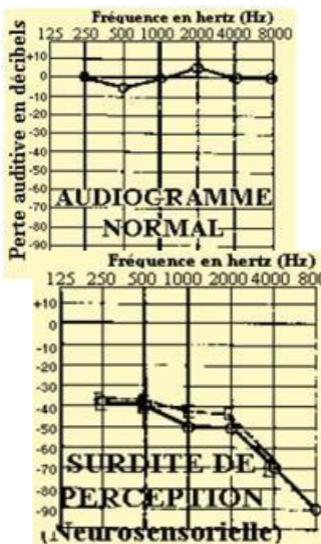
On détermine ensuite plusieurs paramètres :

- Seuil d'intelligibilité (à 50%) : intensité sonore pour laquelle le sujet perçoit plus de 50% des mots. (Normalement : 10 dB)
- Maximum d'intelligibilité : pourcentage maximal de mots correctement perçus. (Normalement : 100%)
- Pourcentage de discrimination : pourcentage de mots compris lorsque l'intensité est de 35 dB supérieurs au seuil d'intelligibilité. (Normalement 100%)

2) Audiométrie tonale liminaire

Elle cherche les seuils de sensibilité à différentes gammes de fréquence.

Le résultat est rapporté sur un graphique (audiogramme) qui comporte en abscisse les fréquences, et en ordonnée negative les intensités en dB. Il s'agit alors de dB de perte auditive par rapport au seuil physiologique normal.



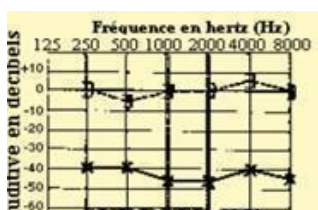
Pour une oreille normale, les courbes de CA et CO sont confondues et se placent sur la ligne 0 dB, qui correspond à leurs seuils.

Note : Une différence de 5 dB n'est pas significative.

Surdité de perception

Si **les seuils sont abaissés en conduction aérienne ET en conduction osseuse**, cela traduit une **surdité de perception** (ou surdité neuro-sensorielle). Au diapason, les deux transmissions sont diminuées de la même intensité.

On peut localiser la lésion où se produit cette surdité de perception selon que l'atteinte touche les hautes fréquences (base) ou les basses fréquences (apex).



Surdité de transmission

Lorsque seules **les vibrations aériennes sont mal transmises, la CO est normale**, il s'agit d'une **surdité de transmission**. Seule la courbe de CA est diminuée.

Cela traduit une atteinte du système tympano-ossiculaire (généralement OE et le conduit auditif externe)

Surdité mixte

Lors d'une surdité mixte (pathologies combinées), **les 2 conductions sont abaissées, mais la conduction aérienne l'est plus**. Les deux courbes sont diminuées, mais la courbe de CA l'est plus.

Tableau récapitulatif des différents types de surdité.



TYPES DE SURDITE		
TRANSMISSION		PERCEPTION
OR Externe Moyenne	Lésion	ciliées OR Interne fibres V.A.A.
CA d CO Normale DCA/DCO < 3	<u>Rinne</u> <u>Weber</u>	CA d CO d DCA/DCO = 3
OR malade	Latéralisation	OR Saine
augmenté Décalage (transmission) 100 % Non	<u>Intelligibilité</u> seuil Maximum Distorsion Perte sur les aigus	augmenté Décalage ≤ 100 % Oui Importante - problème de recrutement
augmenté parallèle sans recrutement	<u>Fowler</u> (en cas de surdité unilatérale) Seuil Courbe	augmenté avec recrutement et sur-recrutement
AUDIOGRAMME		

Note : il n'a pas parlé du test de Fowler

- | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| Audition normale : | Déficience inférieure à 20 dB |
| Déficience auditive légère : | Déficience comprise entre 20 et 40 dB |
| Déficience auditive moyenne : | Déficience comprise entre 40 et 70 dB |
| Déficience auditive sévère : | Déficience comprise entre 70 et 90 dB |
| Déficience auditive profonde : | Déficience supérieure à 90 dB |

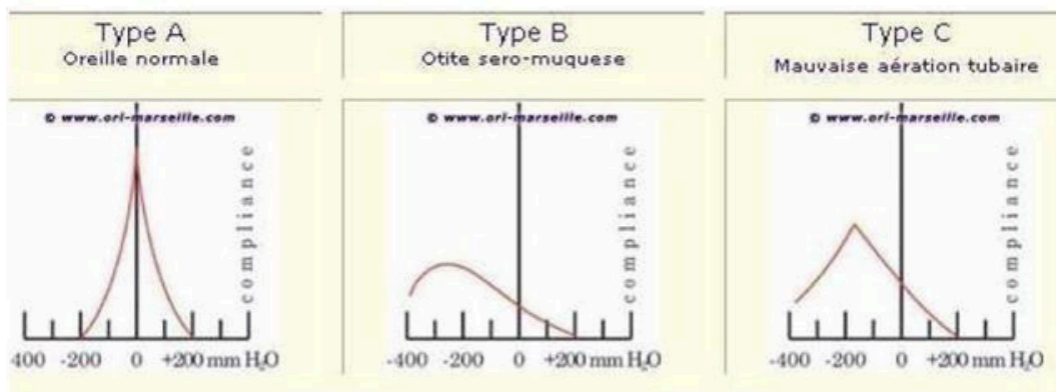
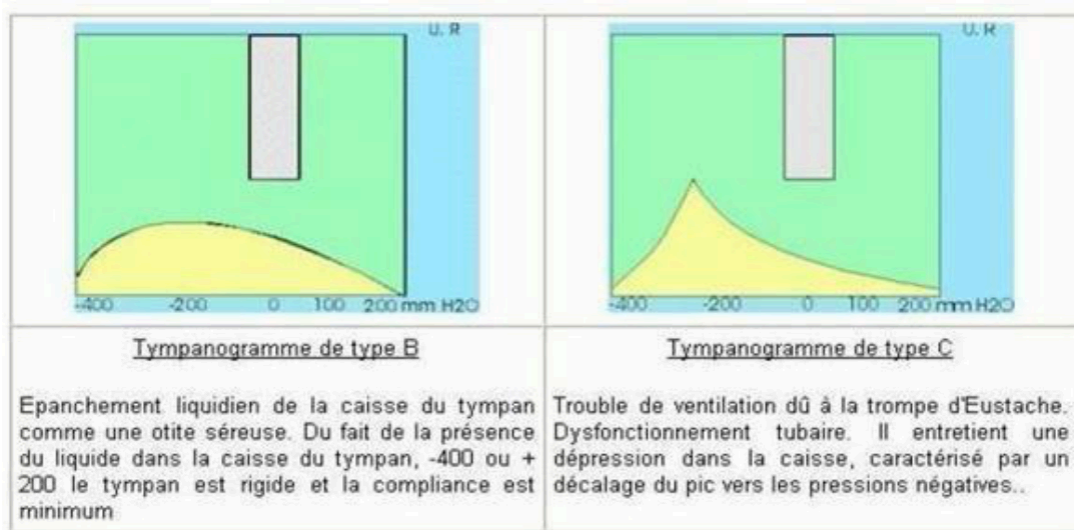


C) Impédancemétrie (passé très rapidement)

On a vu que l'OM est un adaptateur d'impédance.

On va utiliser un impédancemètre de MADSEN. L'énergie acoustique absorbée est donnée par la différence entre l'énergie acoustique incidente (connue) et l'énergie acoustique réfléchie (mesurée). La quantité d'énergie réfléchie par l'oreille est fonction de son impédance.

Grâce à ça, on va pouvoir effectuer une mesure de la compliance (inverse de la rigidité) du tympan. On obtient normalement un pic centré sur la pression zéro traduisant une équipression sur les deux faces du tympan. Un pic décalé traduira un dysfonctionnement de la trompe d'Eustache alors qu'un épanchement dans la caisse du tympan correspondra à une courbe plate.



Exemple type C : on a une dépression au niveau de la caisse du tympan. On a alors un pic d'impédance qui est décalé vers les basses pressions.

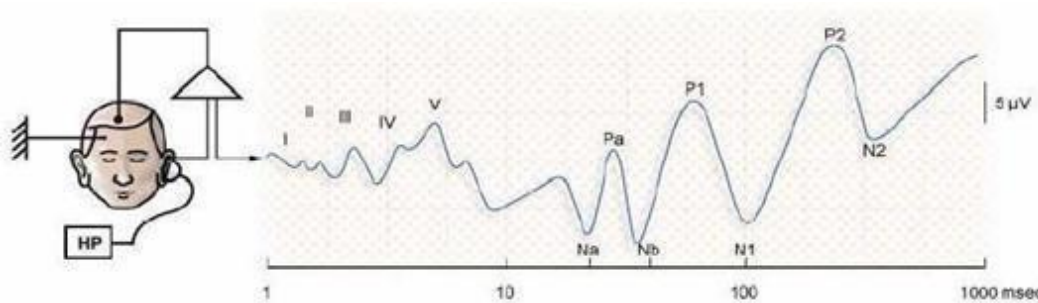
Cet examen permet d'étudier non seulement l'appareil de transmission, mais aussi des mécanismes réflexes tel que celui du muscle de l'étrier.

D) Potentiels évoqués auditifs (PEA)

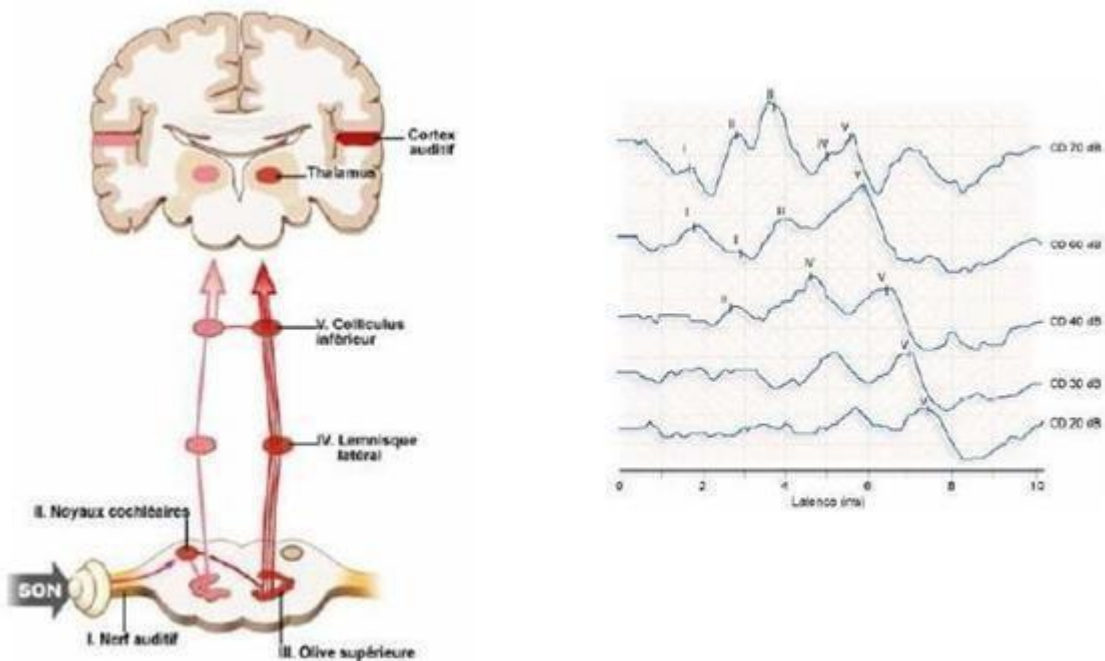
L'activité électrique induite par un stimulus sonore recueillie par des électrodes externes est très faible et doit être extraite du bruit de fond par des méthodes électroniques pour pouvoir être enregistrée (filtrage, moyennage)

On peut ainsi enregistrer des PEA qui se présentent sous la forme de cinq ondes, chacune correspondant à une région anatomique de la voie nerveuse auditive.

L'étude des latences des ondes permet d'apprécier la conduction nerveuse de chaque segment et le niveau d'apparition des ondes constitue un test d'audiométrie objective. On peut le voir comme une sorte d'ECG de la voie nerveuse auditive.



Les PEA ont en grande partie remplacé l'électro-cochléogramme qui nécessitait la pose d'une électrode à travers le tympan (ce qui est moyennement cool).



E) Otoémissions spontanées et provoquées

Ce sont des sons de très faible intensité, générés par la contraction des CCE et transmis par la chaîne des osselets au tympan. Elles sont essentiellement utilisées chez les nouveau-nés pour explorer des surdités chez des personnes qui ne peuvent pas parler. Permet de voir la conduction des cellules ciliées.

Elles sont émises dans le conduit auditif externe où on peut les enregistrer à l'aide d'un microphone miniaturisé.

Elles sont observées chez 70% des nouveau-nés et 40% des adultes. C'est donc un phénomène touchant préférentiellement les enfants et nouveau-nés. Elles peuvent être l'origine d'acouphènes transitoires ou permanents suite à une lésion traumatique ou ototoxique.

La sonde acoustique miniaturisée est introduite dans le MAE. Après stimulation pendant 2,5ms par un microémetteur pouvant tester des fréquences de 700 à 5 000 Hz, on enregistre dans le microphone récepteur avec un délai de 20 ms, un second son d'intensité très faible. C'est le signal émis par les CCE.

Ce délai correspond au temps mis par le son stimulant pour atteindre l'oreille interne, et pour que les otoémissions engendrées par la contraction des CCE regagnent le CAE.

Ce test est un témoin objectif simple rapide non invasif et non onéreux de l'intégrité fonctionnelle des CCE.

QCM :

Concernant la biophysique de l'audition :

- A. Les sons purs sont des signaux périodiques et sinusoïdaux.**
- B. Les sons complexes ne peuvent pas être décomposés en sons purs.**
- C. Les bruits ont toujours une périodicité mesurable par leur fréquence et leur amplitude.**
- D. Un son complexe est composé uniquement d'une fréquence fondamentale.**
- E. Aucune des propositions n'est exacte.**

Correction :

A

Correction A : Vrai.

Les sons purs sont des ondes parfaitement sinusoïdales et périodiques, caractérisées par une seule fréquence.

Correction B : Faux.

Les sons complexes peuvent être décomposés en une somme de sons purs grâce à l'analyse de Fourier.

Correction C : Faux.

Les bruits sont caractérisés par une absence de périodicité et sont souvent désordonnés.

Correction D : Faux.

Un son complexe est constitué d'une fréquence fondamentale et de ses harmoniques (multiples de cette fréquence).

Correction E : Faux.

Quelle affirmation concernant la tonotopie cochléaire est correcte ?

- A. La base de la membrane basilaire est spécialisée pour les basses fréquences.**
- B. L'apex de la cochlée est plus rigide que sa base.**
- C. Chaque cellule ciliée interne est associée à une fréquence spécifique.**
- D. La tonotopie cochléaire est principalement due aux cellules ciliées externes.**
- E. Aucune des propositions n'est exacte**

Correction :

C

Correction A: Faux.

La base de la membrane basilaire est spécialisée pour les hautes fréquences, car elle est étroite et rigide.

Correction B : Faux.

L'apex est plus souple et plus large que la base, ce qui le rend sensible aux basses fréquences.

Correction C: Vrai.

Les cellules ciliées internes assurent la transduction des vibrations mécaniques en signaux nerveux, chaque cellule étant associée à une fréquence particulière selon sa position sur la membrane basilaire.

Correction D: Faux.

La tonotopie est déterminée par les propriétés mécaniques passives de la membrane basilaire, même si les cellules ciliées externes amplifient les vibrations locales.

Correction E: Faux.