UE 3 – Biophysique

Ondes sonores et audition

Dr Romain LE PENNEC – PHU médecine nucléaire
Mardi 08 septembre 2026

GETBO
Groupe d'Étude de la Thrombose de Bretagne Occidentale

UBO
Université de Bretagne Occidentale

CHU BREST
CENTRE HOSPITALIER UNIVERSITAIRE

Plan

- I. Propriétés des ondes sonores
- II. Phénomènes subjectifs de l'audition
  - Tonie
  - Sonie
  - Timbre
  - Autres phénomènes subjectifs de l'audition
- III. Phénomènes objectifs de l'audition
- IV. Types de surdité
- V. Explorations de la fonction auditive

I. Propriétés des ondes sonores

- **<u>Onde sonore:</u>**

Subjectivement : sensation retirée grâce à l'oreille

Objectivement : vibration d'un milieu matériel

  - Onde mécanique progressive
  - Propagation dans un milieu matériel élastique (gaz, liquide, solides).
  - Caractérisée par le mvt des particules qui constituent le milieu de propagation
  - Ne se propage pas dans le vide.

Distinction Son/Bruit

Une sensation auditive perçue par les oreilles, a pour origine un mouvement.

- **Bruits :**
  - porte qui claque
  - explosion

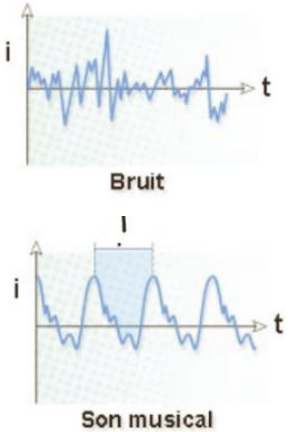
- **Sons :**
  - vent dans les arbres
  - voix qui chante
  - diapason frappé

Distinction Son/Bruit

- **<u>Dispositif d'observation :</u>**

La figure observée sur l'écran d'un oscillographe cathodique reproduit fidèlement le mouvement de la membrane des micros:

- Expériences
  - <u>Bruits</u>: Signal confus, désordonné
  - <u>Sons</u>: Signal dit <u>sinusoïdal</u>
    Voix humaine

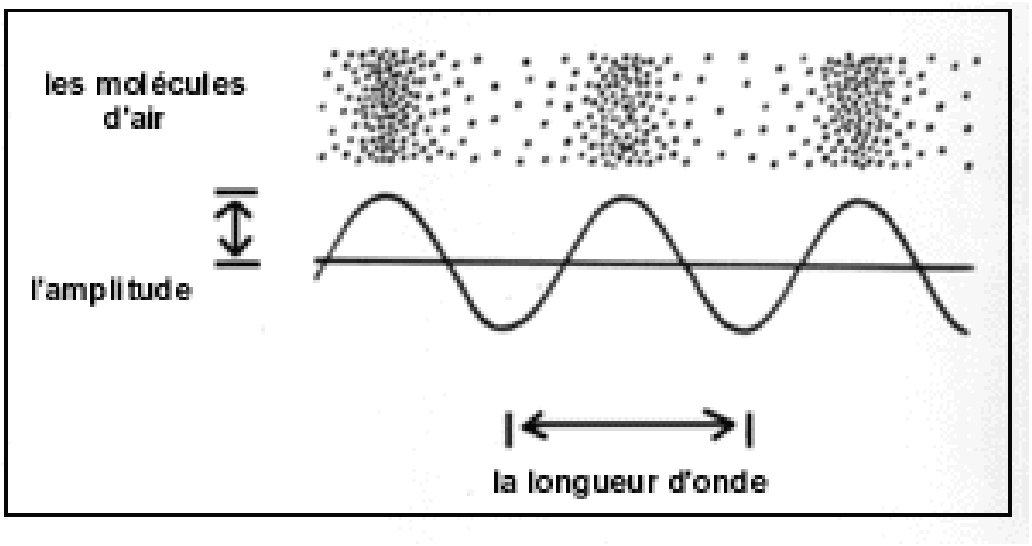


Le signal correspondant à un son présente un motif qui se produit régulièrement : il est <u>périodique</u>

Définition : son

Phénomène <u>périodique</u>

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



Définition : son

- La source vibre en effectuant un grand nombre de fois le même mouvement qui crée la succession de dépression et de compression dans le milieu propagateur.

- **Période**: La durée d'un mouvement de la source :

  On la note **T** et on la mesure en secondes **(s).**

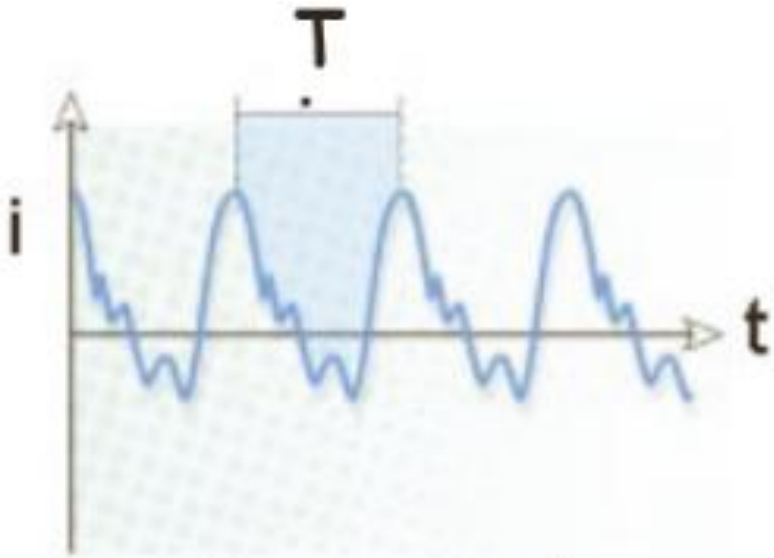
- **Fréquence**: inverse de la période
  Le nombre de mouvements effectués par la source en une seconde s'appelle la fréquence de la source

  On la note **N** et on l'exprime en Hertz **(Hz).**

Définition : son

- Sons purs: sons sinusoidaux

- Sons complexes: sons périodiques associant plusieurs sinusoïdales



Son musical

Définition : bruit

Son non périodique, le plus souvent bref, avec une multitude de composante

Cas particulier: « bruit blanc » à spectre continu

Définition : son

Diapason :

440 Hz = 440 aller et retour/seconde

T=1/440 ou T=1/N.

Fréquences perçues par l'oreille humaine: comprises entre 20 Hz et 20000 Hz. Cet intervalle diminue avec l'âge.

N < 20 Hz = infrasons
N > 20 000 Hz = ultrasons perçus par certains animaux.

Fréquences faibles -> sons graves
Fréquences élevées -> sons aigus

Définition : son

La vitesse de propagation ou célérité d'un son dans un milieu élastique possède une propriété remarquable:

Dépend uniquement du milieu considéré notamment pression et température

Ne dépend pas du son qui se propage

Ex: dans l'air à température ordinaire,

C = 340 m/s

Définition : son

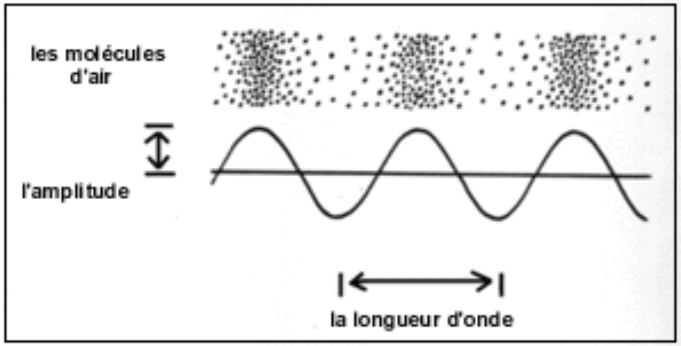
Pendant le temps **t**, le son parcourt une certaine distance (distance qui varie avec la célérité du son **c**)

$$(\lambda)\ \text{Distance} = (c)\ \text{Vitesse} * (t)\ \text{Temps}$$

$$m \qquad m.s^{-1} \qquad s$$

$$(\lambda)\ \text{Distance} = (c)\ \text{Vitesse} / (\nu)\ \text{Fréquence}$$

Définition : pression acoustique



1. Pression acoustique p

$$p = P_M - P_0$$

p: pression acoustique

P_M: pression instantanée du fluide au point M

P_0: pression du fluide à l'équilibre

$$p = Zv$$

$$Z = \rho c$$

V : vitesse de déplacement des particules
Z : impédance acoustique (résistance à la propagation de l'onde)
ρ : Masse volumique
C : célérité (vitesse de propagation de l'onde)

Définition : pression acoustique

- L'oreille est très sensible à des variations de pression acoustique (Pa ou Pascals) puisque le rapport des pressions acoustiques entre le 1er son audible et un son douloureux est de 10^6.

- Seuil d'audibilité: $P_0 = 2.10^{-5}$ Pa

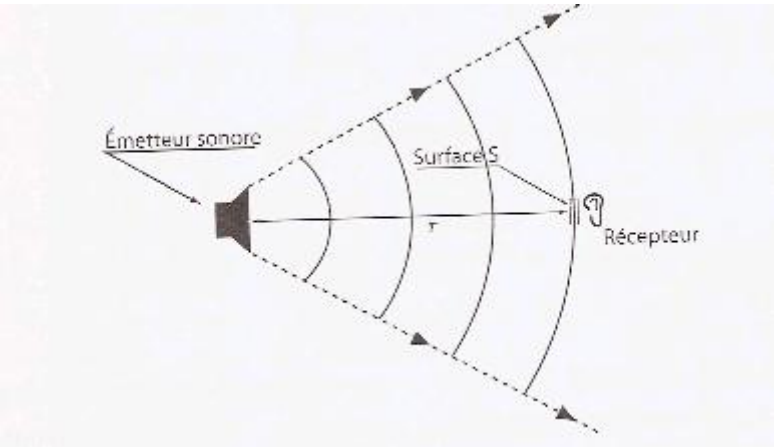
  seuil douloureux: $P = 20$ Pa

Définition : pression acoustique

2. Puissance sonore = flux d'énergie en watts (W)

3. Intensité sonore

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



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

Pour une onde sphérique

Définition : décibels

- **<u>Echelle logarithmique des décibels</u>**
- Échelle logarithmique découpe en 120 décibels l' échelle de sensibilité de l' oreille
- niveau sonore L d' un son de puissance surfacique W par rapport à un son surfacique W_0 est égal en bels (B) à:

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

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

- W0 = puissance de référence = 10^{-12} W.m^{-2} (seuil audibilité à 1000 Hz)

Définition : décibels

Pression $N.m^{-2}$ = 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
2.10^{-1}	10^{-4}	80	Circulation, rue à gros trafic
2.10^{-2}	10^{-6}	60	Conversation
2.10^{-3}	10^{-8}	40	Pièce tranquille
2.10^{-4}	10^{-10}	20	"La nuit", voix chuchotée
2.10^{-5}	**10^{-12}**	**0**	**Seuil audition personne jeune 1 à 5 kHz**
$6,3.10^{-6}$	10^{-13}	-10	Seuil chat 1 à 10 kHz

Définition : décibels

Exemple : 2 sources sonores émettent 2 sons de niveaux sonores L1 (90 dB) et L2 (80 dB). Résultante ≠ 170 dB

Comme $L_1 = 10\log\frac{W_1}{W_0}$

et

$L_2 = 10\log\frac{W_2}{W_0}$

alors $W_1 = W_0 * 10^{\frac{L_1}{10}}$

et

$W_2 = W_0 * 10^{\frac{L_2}{10}}$

donc

$$W = W_1 + W_2 = W_0(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}})$$

$$L = 10\log\frac{W}{W_0} = 10\log(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}})$$

$$L = 10\log(10^{\frac{90}{10}} + 10^{\frac{80}{10}}) = 90.4dB$$

II. Phénomènes subjectifs de l'audition

Les paramètres physiques décrivant une onde sonore sont au nombre de 3:

- fréquence
- intensité sonore ou puissance surfacique
- spectre d' amplitude

A ces propriétés physiques correspondent des sensations:

Caractéristique du son	**Perception**
Fréquence	Hauteur ou Tonie
Intensité sonore	Sonie
Spectre d' amplitude	Timbre

Mesure directe d'une sensation impossible

II. Phénomènes subjectifs de l'audition

- Tonie (ou hauteur), reliée à la fréquence du son;

  - aigu ou grave

- Sonie, reliée à la puissance

  - fort ou faible

- Timbre : 2 sons avec même fréquence et même puissance créés par 2 instruments différents

II.A. Tonie

1. Définition:

Qualité sonore physiologique distinguant un son aigu d'un son grave

Son aigu: fréquence élevée

Son grave: fréquence basse

Nécessiter de tenir compte de:

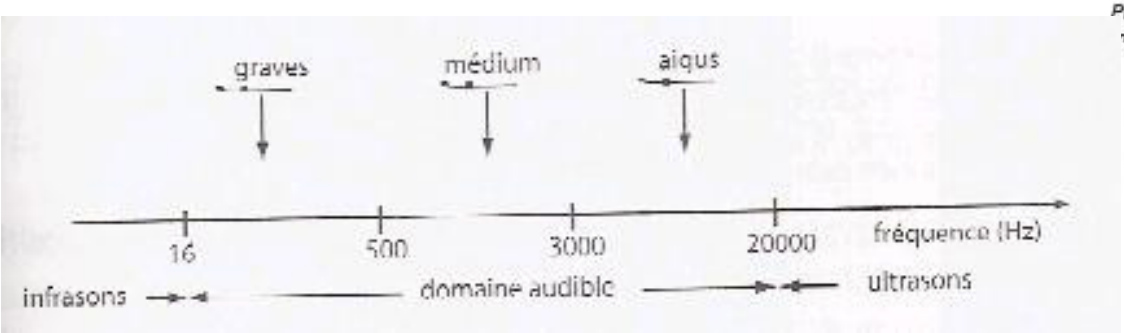
Intensité du son: plus intense, plus semble grave

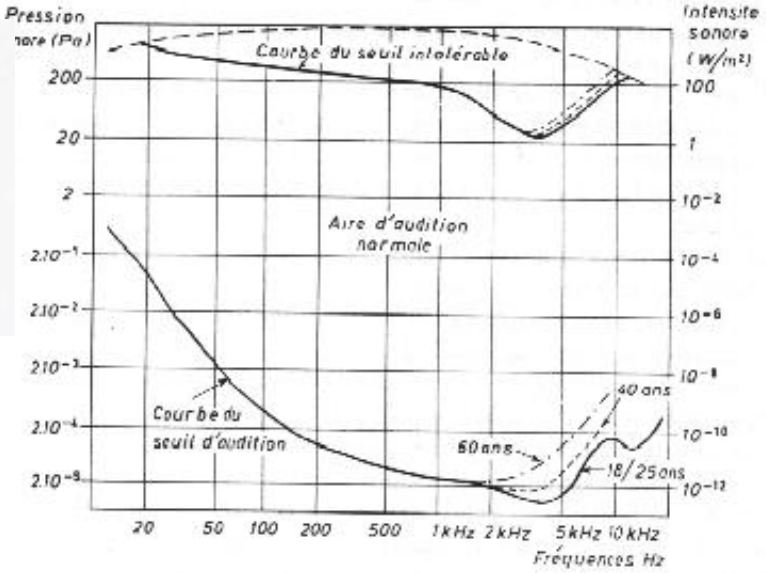
Durée du son: ≥ 10 ms pour analyser un son

II.A. Tonie

2. Seuils absolus de hauteur:

Valeurs extrêmes de fréquence percues par l'oreille





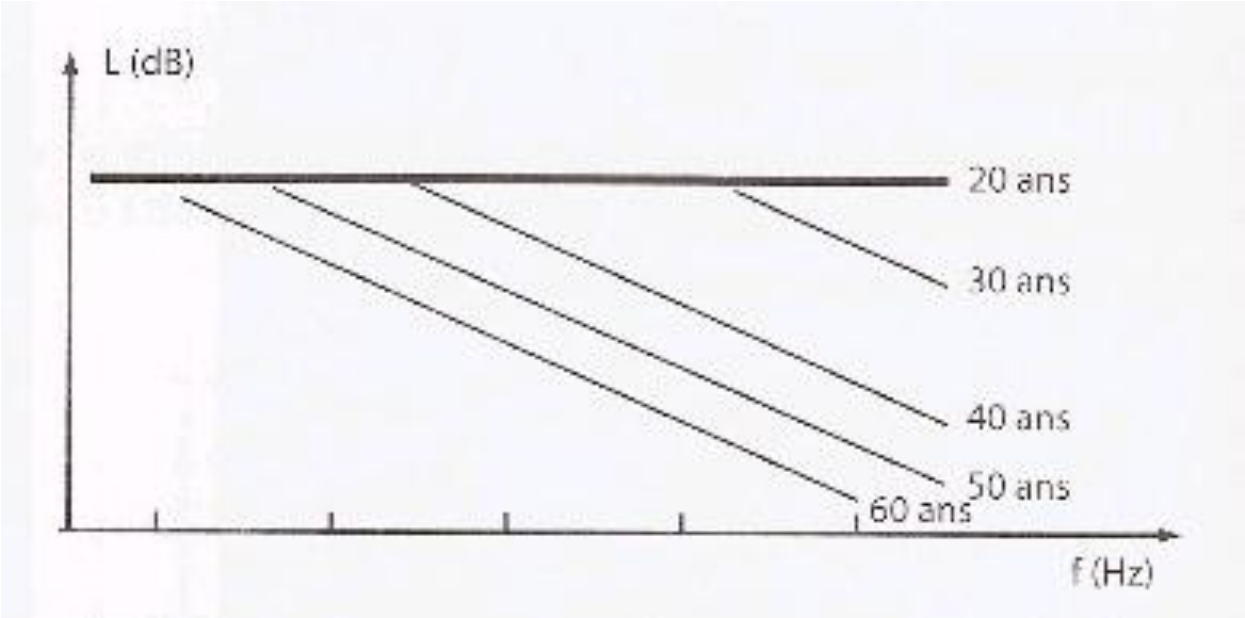
20 Hz ≤ Oreille normale ≤ 20 000 Hz

> 20 000 Hz: Ultrasons

< 20 Hz: Infrasons

II.A. Tonie

Variation du domaine audible diminue avec l' âge (presbyacousie)



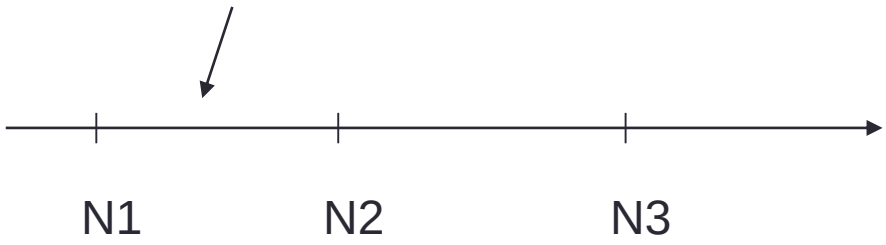
Variation entre les espèces (ex: chauves-souris entendent US)

II.A. Tonie

3. Seuil différentiel absolu de hauteur:

Variation de fréquence nécessaire pour que l'oreille perçoive une différence.

$$\Delta N = N2 - N1$$



ΔN : pas constant, augmente quand fréquence augmente

II.A. Tonie

4. Seuil différentiel relatif de hauteur:

Ex: **$\Delta N/N = 1/80$**

Si 80 Hz, + 1 Hz suffisant pour obtenir un son différent

Si 800 Hz, + 10 Hz nécessaire pour avoir un son différent

NB: musiciens (1/1000)

NB: domaine de 400 à 4000 Hz que l'oreille est la plus sensible aux différences de fréquence (1/300)

II.B. Sonie

1. Définition:

Qualité physiologique d'un son définissant sa force.

La sonie dépend:

a. **puissance acoustique** (plus elle est importante, plus le son est fort)

b. **fréquence**

c. **durée** (> 100 ms) pour déterminer si le son est fort ou faible

II.B. Sonie

2. Seuil absolu

Nécessitée d'avoir une puissance minimale pour que les sons soient perçus (ou seuil liminaire d'audition)

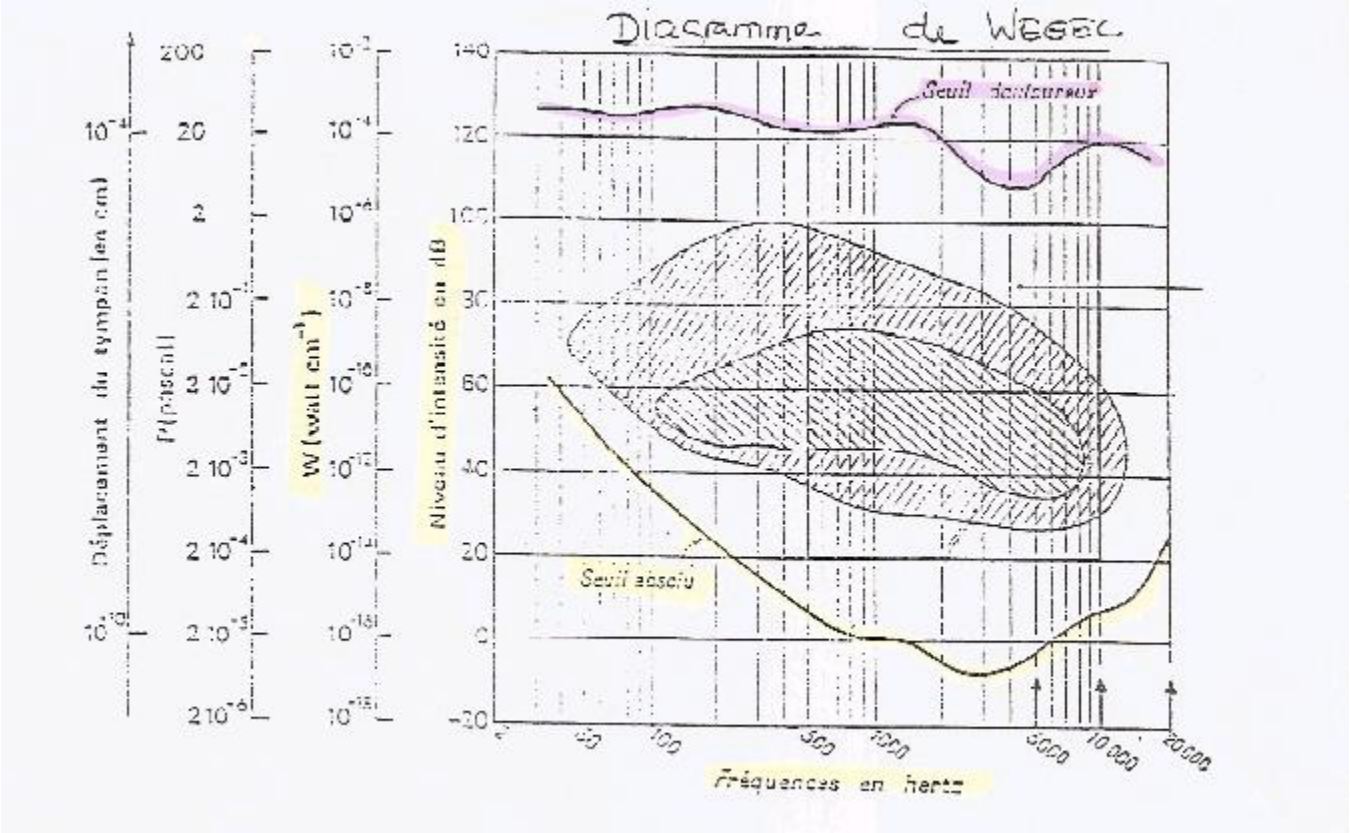
Seuil haut correspondant à l'intensité maximale au-delà de laquelle le son est douloureux

Étude du seuil absolu = **audiométrie**

Pour individu normal, max de sensibilité est entre 1000 et 3000 Hz

II.B. Sonie

Diagramme de Wegel



II.C. Timbre

1. Définition:

Qualité physiologique d'un son qui permet de reconnaître 2 sons de même hauteur, de même sonie mais émis par 2 instruments différents

Son pur: terne et sans timbre

Son complexe: timbre lié à la richesse en harmonique

Harmoniques : multiples de la fréquence de base

II.D. Autre phénomènes subjectifs de l'audition

3. Orientation auditive:

= Ecoute binaurale

nécessite 2 oreilles

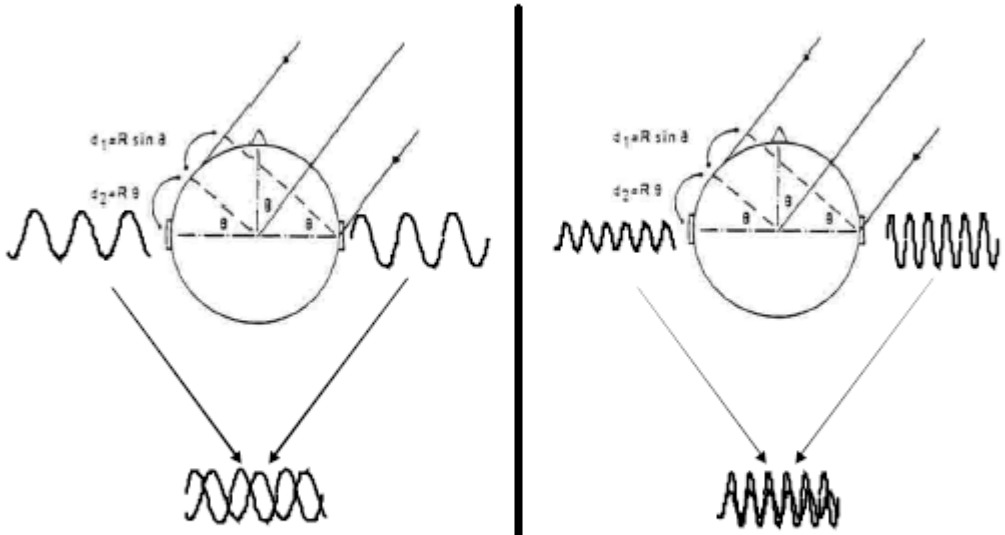
difficulté plus ou moins importante pour savoir d' où provient le son

gauche/droite: facile

devant/derrière: plus difficile

II.D. Autre phénomènes subjectifs de l'audition

Différences interaurales (entre les deux oreilles)

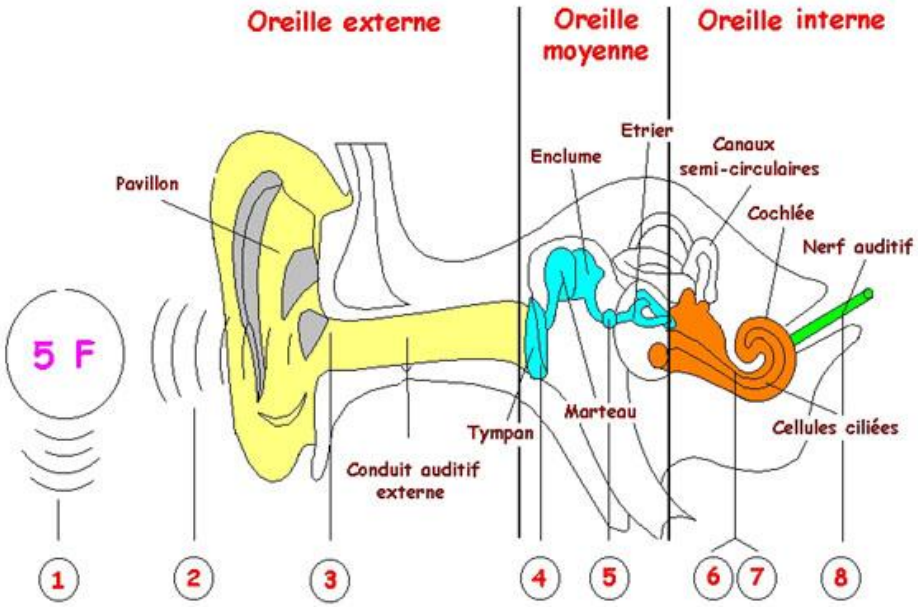


Différence de temps | **Différence d'intensité**

(Extrait de Paul AVAN, Bichat 2003)

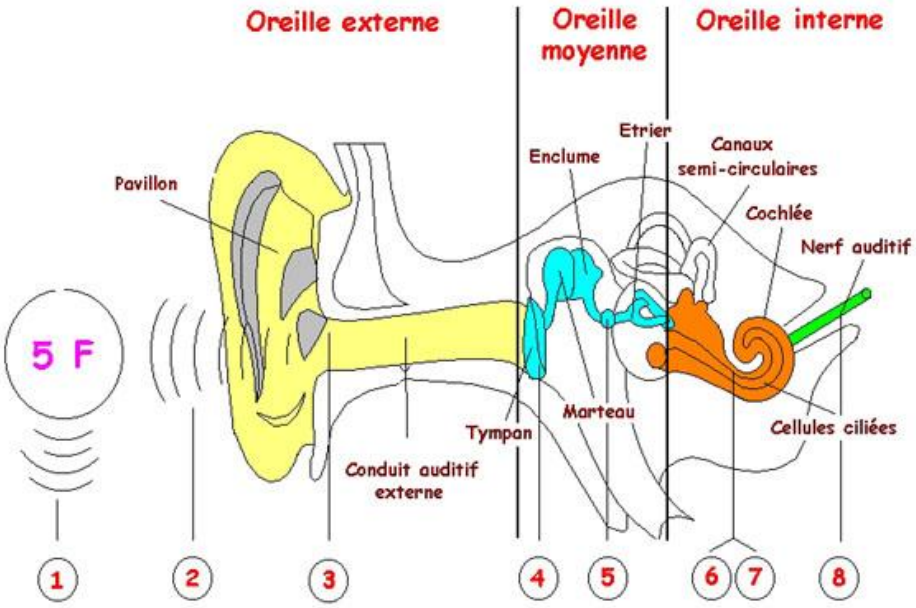
Anatomie

<u>L' oreille externe</u> 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 par le tympan (4).



Anatomie

<u>L'oreille moyenne</u> 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. Communique avec le rhinopharynx par la trompe d'Eustache (égalisation des pressions).



III.A. Oreille externe – oreille moyenne

1. Oreille externe:

a. Composition:

-Pavillon

-rôle limité, de **localisation** et de **protection** de l'oreille moyenne (amortissement du passage de l'air)

-sert à capter et focaliser le signal sonore

-CAE

-rôle d'**amplification** du signal (+ 10 à 15 dB)

III.A. Oreille externe – oreille moyenne

2. Oreille moyenne

a. Composition:

- Chaîne tympano-ossiculaire
  * membrane tympanique mobile
  * osselets: marteau (malleus), enclume (incus), étrier (stapes)
- trompe d'Eustache
- communication avec l'oreille interne par la fenêtre ovale (RV) et ronde (RT)

Membrane tympanique normale

La chaine ossiculaire est

vue par transparence (Ad)

Membrane lésée

III.A. Oreille externe – oreille moyenne

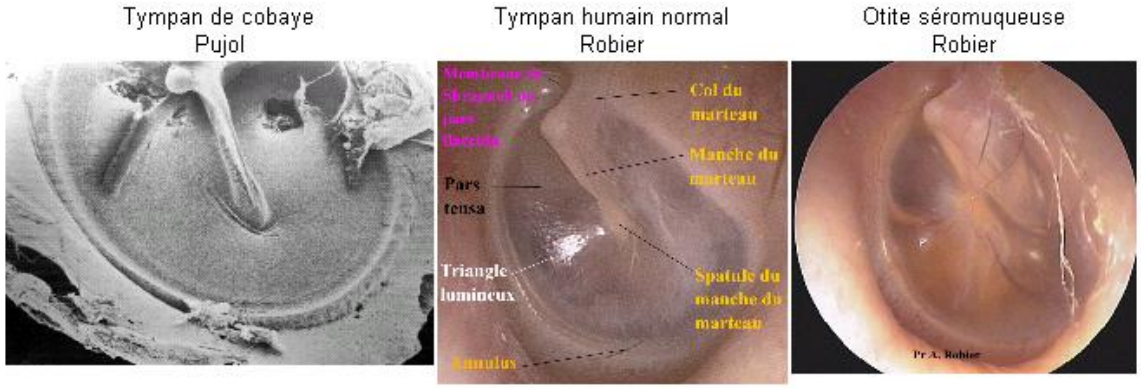
2. Oreille moyenne

b. Fonctions:

- Transmission OM-OI (transformation vibrations aériennes en vibrations liquidiennes)

- Adaptation d'impédance avec phénomène d'amplification acoustique

- Protection de l'OI



III.A. Oreille externe – oreille moyenne

- Qd le son passe d'un milieu aérien à un milieu liquidien, seul 1/1000 est transmis.

- Dc au passage de l'OM à l'OI, perte de 30 dB par reflexion

- OM: correction : adaptateur d'impédance

III.B. Oreille interne

Composition:

2 organes sensoriels

- organe de l'équilibre: 3 canaux semi circulaires, vestibule
- organe de l'audition: cochlée (= limaçon)

III.B. Oreille interne

<u>Anatomie de la cochlée</u>

- tube enroulé sur lui-même comme une coquille d'escargot

- longueur: 35 mm
- diamètre: 2 mm
- 2 tours ¾ de spires

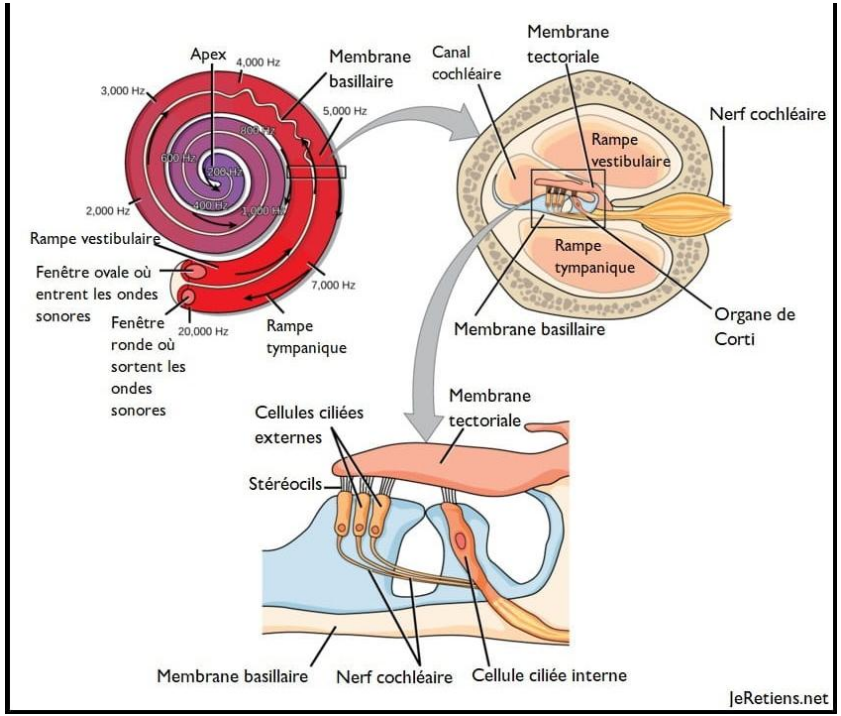
+ axe creux contenant le nerf auditif nommé columelle

composé de la rampe tympanique, rampe vestibulaire et du canal cochléaire

III.B. Oreille interne

Canal cochléaire :

- Est séparé de la RT par la membrane basilaire (insérée sur le bord libre de la lame osseuse spirale)
- Est séparé de la RV par la membrane de Reissner, attachée sur la strie vasculaire, tendue obliquement vers la lame spirale



III.B. Oreille interne

RV et RT contiennent périlymphe (proche liquides extra-cellulaires)

Canal cochléaire contient endolymphe

Péri et endolymphes ne sont ni sécrétées ni réabsorbés; composition chimique due à des phénomènes de transports ioniques locaux

Volumes impliqués très faibles (OI = 225 µl; RT = 44 µl, RV = 31,5 µl, CC = 7,7 µl)

III.B. Oreille interne

Canal cochléaire :

- contient l'organe de Corti dont les cellules ciliées internes et externes vont assurer :
  - l'amplification (CCE)
  - la sélectivité
  - la transduction de l'énergie mécanique (Pression) en énergie électrique (CCI) (Potentiel d'action du nerf auditif).

III.B. Oreille interne

<u>Organe de Corti :</u>

Composition:

CCI (3500 cellules) responsable de transduction mécano-électrique

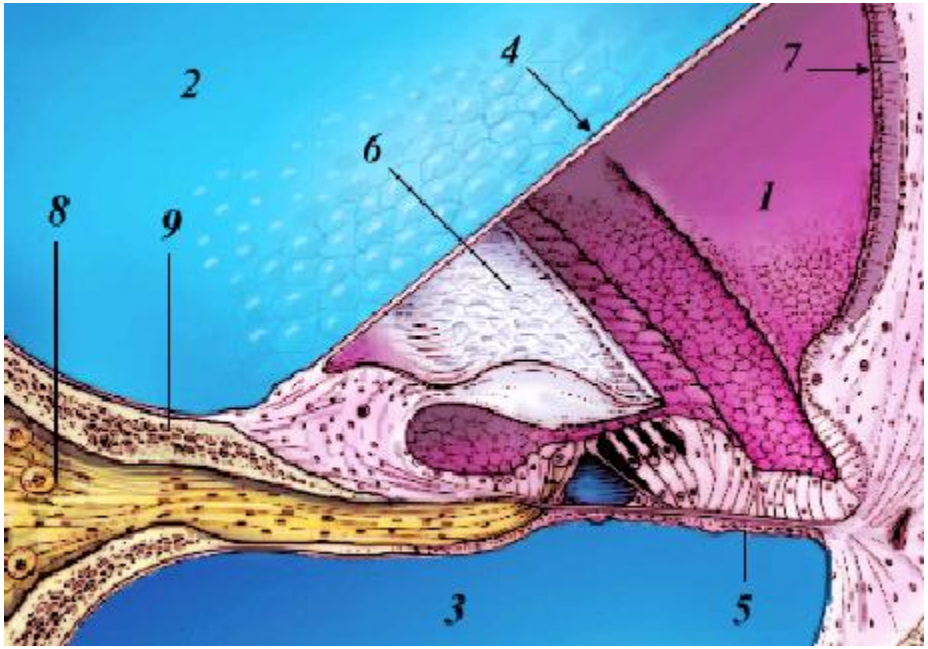
CCE responsable du couplage mécanique entre mb basilaire et tectoriale (12000 cellules)

seulement 16000 cellules (100 millions récepteurs pour œil), non renouvelables

très fragile → surdité de perception

III.B. Oreille interne

- 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 (8).



III.B. Oreille interne

La membrane basilaire: base de la mécanique cochléaire

- 34 mm de longueur
- Prolonge la lame osseuse spirale, et à son bord externe se fixe à la paroi cochléaire par le ligament spiral, très élastique.

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

- **Importance fonctionnelle** primordiale, car c'est sur elle que repose **l'organe de Corti** dont les CCI assurent la **transduction** de la stimulation mécanique en phénomène bioélectrique.

III.B. Oreille interne

Physiologie de la cochlée :

- FO vibre et transmet les vibrations à la périlymphe
- Comme liquides non compressibles, FR déplace dans l'autre sens
- Mouvements des fenêtres en opposition de phase
- Mouvements des liquides entraîne une déformation mb basilaire (où repose l'organe de Corti)

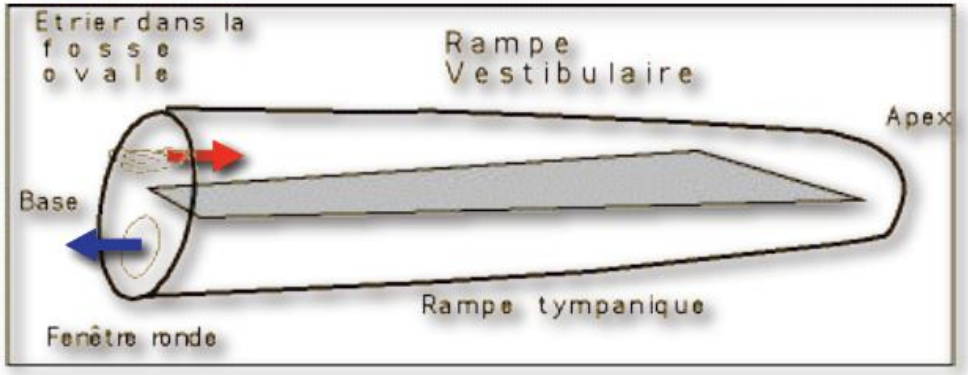


Schéma de la cochlée déroulée

III.B. Oreille interne

Théorie de l'onde propagée : Tonotopie passive

- Von Békesy (Prix nobel en 1961) montra que la membrane basilaire n'est pas tendue et ne peut donc être associée à une succession de cordes vibrantes.

- MB : pas de vibration propre : ses mouvements ne peuvent être que passifs provoqués par les mouvements des liquides cochléaires.

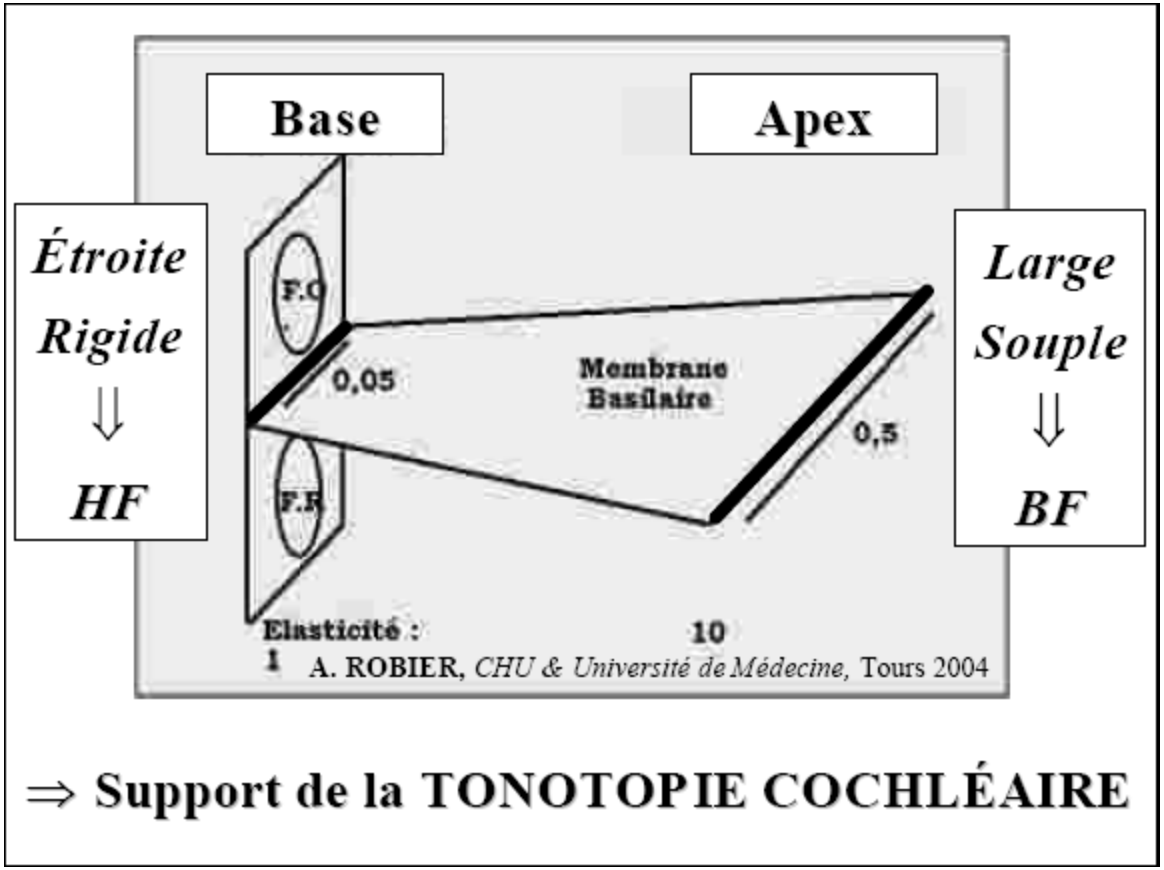
- Une **vibration de l'étrier** va donc provoquer une **différence de pression hydraulique** entre les deux rampes, à l'origine d'une **vibration de la MB.**

III.B. Oreille interne

Tonotopie passive

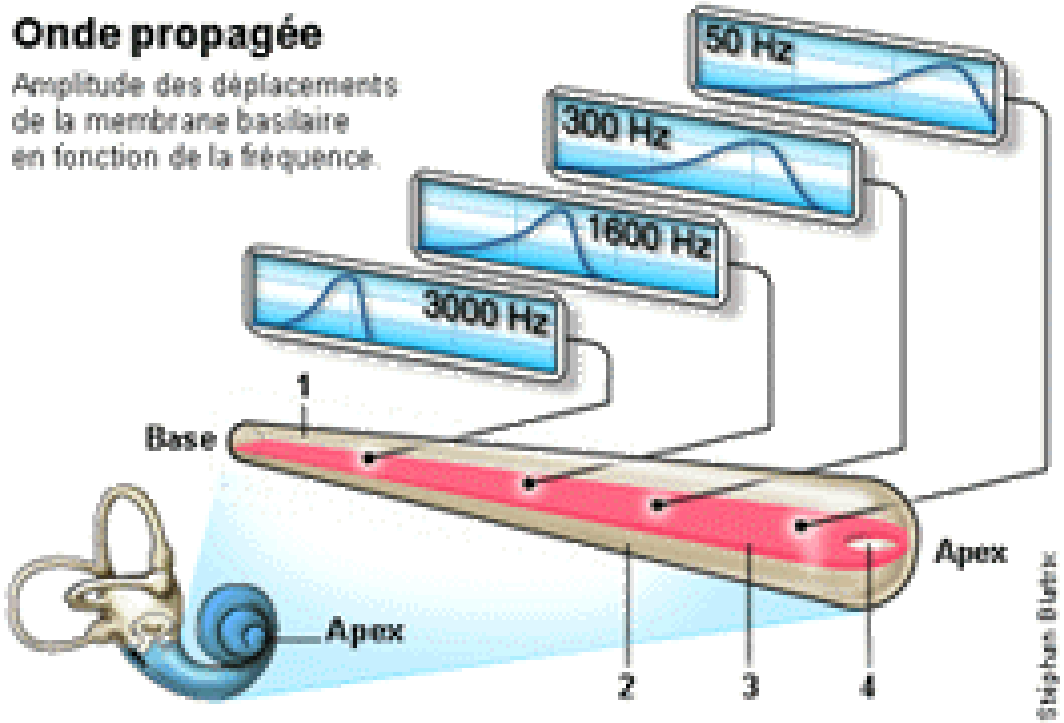
- Puisque du fait de sa structure la membrane basilaire est beaucoup plus rigide à la base qu'au sommet, pour une même pression continue, la déformation au sommet est 105 fois plus grande qu'à la base;
- Les oscillations de pressions dans la RV se traduisent au niveau de la MB par une **onde propagée** 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.

III.B. Oreille interne



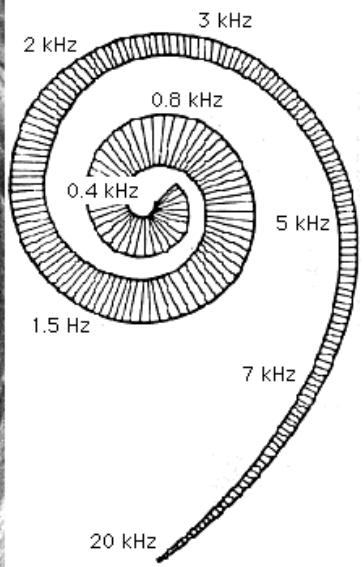
III.B. Oreille interne

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



III.B. Oreille interne

- Von Bekesy établit ainsi une véritable carte de la distribution des maximum sur la membrane basilaire



III.B. Oreille interne

* **Organe de Corti** = organe sensoriel auditif

- composé de 16000 cellules ciliées :

⇨ 3 rangées de **cellules ciliées externes** (≈ 12500 cellules) aux propriétés **contractiles**

⇨ 1 rangée de **cellules ciliées internes** (≈ 3500 cellules) assurant la **transduction mécano-neurale**

* **Nerf auditif** = ensemble de 35.000 **fibres auditives afférentes** :

- 10 fibres par cellule ciliée interne (type I)
- 1 fibre pour 20 cellules ciliées externe (type II)

III.B. Oreille interne

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

- 1. les **vibrations sonores** transmises à la périlymphe font **onduler la membrane basilaire**
- 2. les **stéréocils des CCE** implantés dans la membrane tectoriale sont **déplacés** horizontalement; **CCE se dépolarisent** qd les stéréocils se déplacent vers extérieur
- 3. les **CCE** dépolarisées **se contractent** (électromotilité). Ce mécanisme actif amplifie la vibration initiale et joue un rôle de filtre sélectif
- 4. les **CCI** sont **excités** quand leurs stéréocils sont déplacés par la mb tectoriale
- 5. la **synapse** entre **CCI** et **fibre du nerf auditif** est **activée** et un message est envoyé au cerveau

III.B. Oreille interne

Fonction de l'OI:

- **transduction du stimulus auditif**

Transformation des vibrations mécaniques en impulsions électriques transportables par le nerf auditif

2 mécanismes distincts mais complémentaires:

→ système hydromécanique passif (déformation de la membrane basilaire en fonction du stimulus → Tonotopie cochléaire passive)

→ Micromécanismes cochléaires actifs (pour sons inf à 50 dB)

III.B. Oreille interne

RESUME:

- Rôle de l'oreille interne: transformer une onde mécanique en signal électrique
- Pression acoustique exercée sur les membranes cisaillent les cellules ciliées et les excitent et les cellules se dépolarisent (ouverture des canaux ioniques)
- Potentiels de repos et de stimulation des cellules ciliés

IV. Types de surdité

- **Surdités de transmission**

  Elles traduisent une atteinte de l'oreille externe ou moyenne, donc de l'appareil de transmission du son.

- **Surdités de perception**

  Il s'agit de l'atteinte de l'oreille interne ou de la voie nerveuse auditive. Ce sont des surdités neurosensorielles.

IV.A. Surdité de transmission

1. Atteinte de l'oreille externe

Le pavillon: tumeurs, infections, hématomes après traumatisme.

Le CAE peut-être obstrué par un bouchon de cérumen, ou un corps étranger. Il peut être infecté localement (furoncle) ou de façon diffuse (otite externe).

IV.A. Surdité de transmission

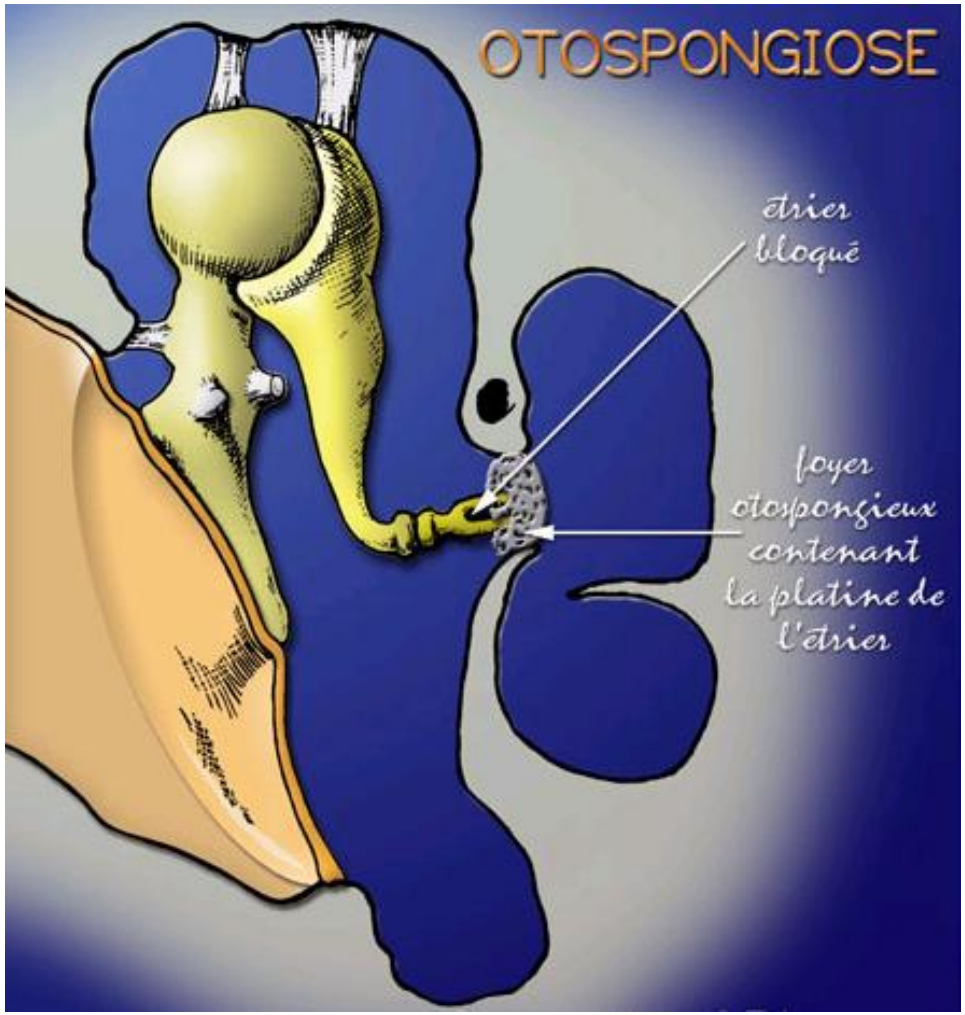
2. Atteinte de l' oreille moyenne

Infections ou otites secondaires à une infection rhinopharyngée propagées par la Trompe d'Eustache, pouvant se compliquer d'une ostéite, avec lésion importante des osselets.

Troubles de la ventilation telle que la catarrhe tubaire : la Trompe d'Eustache s'obstrue, et un vide relatif s'établit dans la caisse du tympan (corrigé par insufflation).

Les lésions chroniques tympano-ossiculaires telle l'otospongiose due à une ankylose de la platine de l'étrier dans la fenêtre ovale par une formation osseuse d'origine indéterminée.

IV.A. Surdité de transmission



IV.B. Surdité de perception

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 (I supérieure à 100 dB). Le traitement est essentiellement prophylactique.
- les barotraumatismes (aviation, plongée).

IV.B. Surdité de perception

2. Toxi-infections :

- - 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 des prothèses électroniques ou mieux numériques.

IV.B. Surdité de perception

3. Troubles liquidiens:

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

IV.B. Surdité de perception

4. Presbyacousie ou 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 à une **diminution de l'amplification par les CCE**, et pourra selon les cas (âge du sujet, degré d'atteinte) être appareillée par des prothèses numériques, ou la pose d'un implant.

IV.B. Surdité de perception

5. Tumeurs:

Neurinome du nerf auditif comprimant les organes voisins.

L'exérèse peut se faire en cas de diagnostic précoce.

Exemples surdité

1. Surdité de transmission:

- Intégrité de l' OI, absence de perte par conduction osseuse

- Perte pour toutes les fréquences par voie aérienne, ++ graves

2. Surdité de perception:

- Perte identique par voie aérienne et osseuse, ++ aigus

3. Surdité mixte: perte par voie aérienne > voie osseuse

V. Examens de la fonction auditive

- Otoscopie (miroir de Clar)
- Acoumétrie
  - Phonique: syllabes chuchotées.
  - Instrumentale: diapasons de diverses fréquences en CA ou CO
- Audiométrie
  - Vocale
  - Tonale liminaire
  - Tonale supraliminaire
- Impédancemétrie
- Potentiels évoqués auditifs
- Otoémissions

V. Examens de la fonction auditive

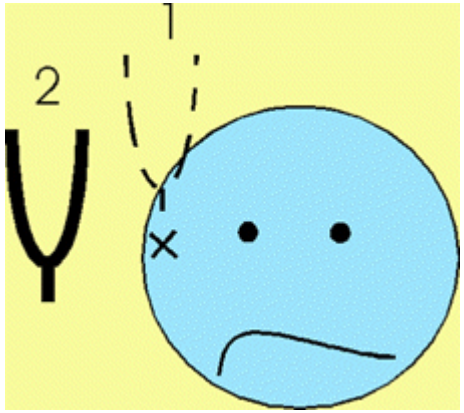
1. Diagnostiquer
2. Évaluer
3. Surveiller

Étude conduction aérienne: étude pour différentes fréquences (de 125 à 10000 Hz en commençant à 1000 Hz) de chaque oreille

Étude de la conduction osseuse à l'aide d'un vibreur sur la mastoïde (plage de fréquence moins étendue de 250 à 6000 Hz; assourdissement indispensable de l'oreille controlatérale car 10 dB d'écart suffisent à l'oreille controlatérale à percevoir le son).

V. Acoumétrie

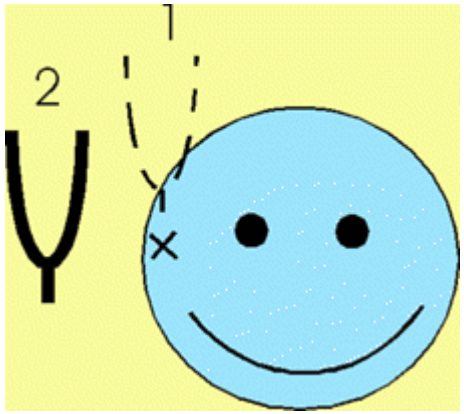
<u>Diapason:</u> détermination des temps de perception osseux et aérien (CA = 3 CO)



<u>Épreuve de Rinne:</u>

compare CA et CO

- CA ↓, CO N → CA/CO < 3
- Rinne négatif
- surdité de transmission (atteinte OE ou OM)



- CA et CO ↓ : CA/CO = 3
- Épreuve de Rinne positive
- Surdité de perception

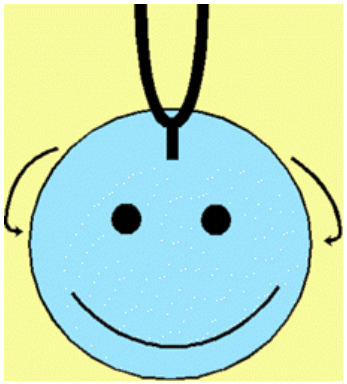
V. Acoumétrie

<u>Épreuve de Weber:</u>

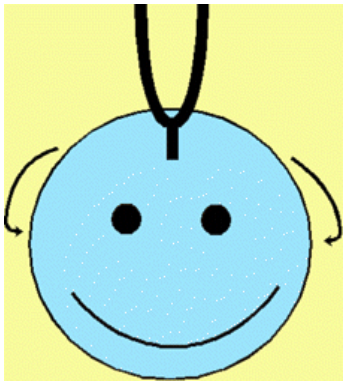
Teste **l'effet de latéralisation en conduction osseuse**

S'il existe une hypoacousie due à une atteinte de la perception neurosensorielle d'une oreille le son sera mieux entendu par le côté sain. On dit qu'il y a latéralisation du côté sain.

Au contraire, dans le cas d'une surdité de transmission, la latéralisation se fait vers le côté atteint.



V. Acoumétrie



Résultat	Interprétation	Explication
Son perçu au milieu (centralisé)	Normal ou surdité bilatérale symétrique	Les deux oreilles perçoivent également le son.
Son latéralisé dans l'oreille atteinte	Surdité de **transmission**	L'oreille atteinte capte mieux les sons par conduction osseuse, car elle est isolée des sons ambiants.
Son latéralisé dans l'oreille saine	Surdité de **perception (neurosensorielle)**	L'oreille atteinte perçoit moins bien toutes les formes de sons, y compris par l'os.