

# L'AUDITION

## I) INTRODUCTION :

L'audition (ouïe) = fonction sensorielle → capacité de percevoir des sons

Succession de phénomènes :

Physique : → Vibration sonore de l'extérieur

Physiologique :

→ Recueil et transmission de la vibration

→ Oreille externe et moyenne

→ Transduction

→ Cochlée

Psychique :

→ transduction → interprétation

## **SIGNAL PHYSIQUE DE L'AUDITION**

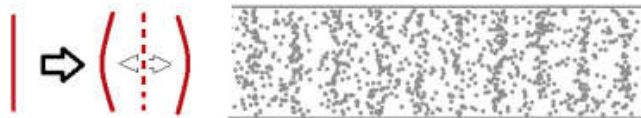
Source sonore :

Perturbation de pression d'un milieu matériel (pas dans le vide) élastique, autour d'une position d'équilibre

Transmission de la pression dans la matière alternant compression et dépression

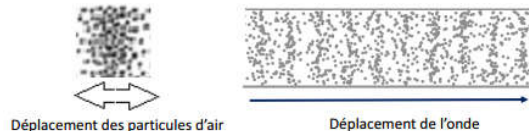
La vibration est transmise à l'air avec alternance de :

- zones de "compression" forte densité des particules
- zones de "dépression" où les particules sont éloignées les unes des autres



L'air subit une variation de pression d'une manière périodique à l'origine d'une onde mécanique longitudinale.

La direction du mouvement des particules est parallèle au sens de déplacement de l'onde.



## Classification des sons :

Les particules d'air vibrent autour d'une position d'équilibre  $X_0$ .

Ils prennent des positions entre  $+a$  et  $-a$  ( $a$ : amplitude du mouvement) La représentation de ces déplacements dans le temps → nature de la vibration

Si la perturbation varie de façon périodique on parle de son pur ou complexe.

Si la perturbation est chaotique elle donne lieu à un bruit.

## **Les sons purs :**

La perturbation correspondant à un son pur se traduit par une courbe

sinusoïdale de la forme :  $X = A \sin(\omega t + \varphi)$

$X$  : position de la particule au temps  $T$  autour de  $X_0$ , sa position d'équilibre

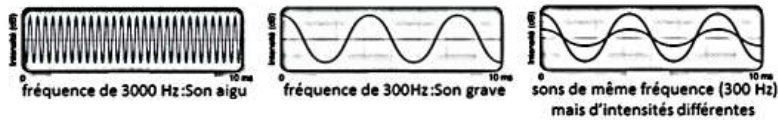
$A$  : amplitude du mouvement

$\omega$  : pulsation ou vitesse angulaire, reliée à la fréquence  $n$  par :  $\omega = 2\pi n$

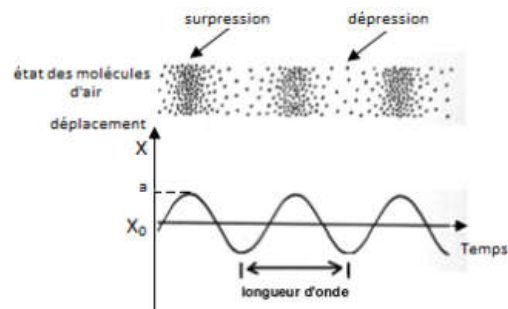
$\varphi$  : phase à l'origine

la fréquence (Hz) représente la hauteur du son (grave ou aigu)

l'amplitude de la courbe représente l'intensité sonore (dB).



### Les sons purs :



Déplacement des particules d'air en fonction du temps, dans le cas d'un son pur

### Les sons complexes :

Ce sont des sons périodiques non sinusoïdaux

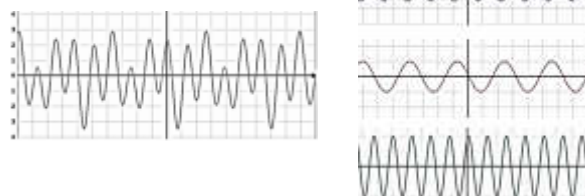
d'après le théorème de Fourier → somme algébrique de plusieurs sinusoïdes :

$$X(t) = \sum_{n=1}^n a_n \sin(\omega_n t + \varphi_n)$$

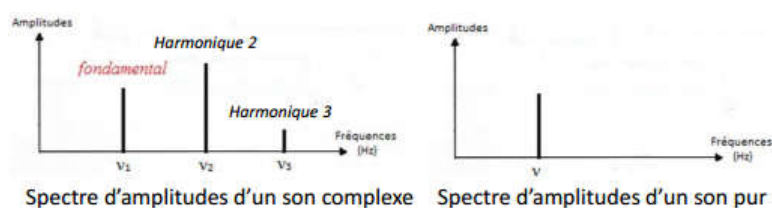
C'est la superposition de plusieurs ondes

- Composante de base: le fondamental (ou l'harmonique fondamental) qui donne au son sa nature: même fréquence  $\nu_1$  que le son global
- D'autres ondes moins perceptibles: les harmoniques  
Avec des fréquences multiples de  $\nu_1$  :  $2 \nu_1$ ,  $3 \nu_1$ ,  $4 \nu_1$  etc.

Un son complexe = superposition de plusieurs ondes

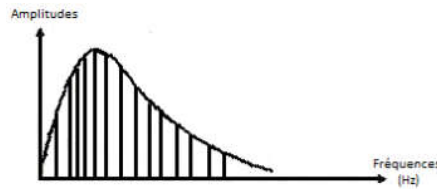


La décomposition d'un son est habituellement représentée par un spectre



### Le bruit :

Son trop complexe pour qu'on puisse lui attribuer une hauteur déterminée  
Assemblage plus ou moins aléatoire de fréquences différentes  
Les sons harmoniques ne sont pas en rapport entre eux = des partiels  
La représentation spectrale d'un bruit donne un spectre continu:



### Caractéristiques physiques des ondes sonores :

#### **PRESSION, PUISSANCE ET INTENSITE, IMPEDANCE**

#### PRESSION :

Le déplacement longitudinal des particules d'air correspond à une succession d'accumulation et raréfaction.

⇒ Surpressions et dépressions (se rajoutent ou se retranchent à  $P_{atm}$ )

⇒ pression acoustique:  $P = \rho v c$  ( $kg\ m^{-1}\ s^{-2}$ )

Avec :

$\rho$ : masse volumique du milieu considéré ( $kg/m^3$ )

$c$  : célérité du son dans ce milieu ( $m/s$ , ne dépend pas de la fréquence)

$v$  : vitesse vibratoire d'un point qui est animé mouvement sinusoïdale  $m/s$

#### PUISSANCE ET INTENSITÉ :

Une source sonore peut être qualifiée par sa puissance acoustique  $W$  (énergie par unité de temps) exprimée en Watts

A distance (source-récepteur) fixe, si la puissance  $\uparrow$ , la sensation sonore  $\uparrow$

Mais à puissance fixe, si la distance  $\uparrow$ , la sensation sonore  $\downarrow$

Donc pour qualifier l'intensité sonore d'une onde il est plus approprié d'exprimer la puissance acoustique surfacique qui caractérise l'intensité acoustique  $I$ :

$I = \text{puissance acoustique}/s$  ( $W/m^2$ ) qui est en relation avec la pression acoustique par:  $I = v P$  avec  $P = \rho v c$  donc  $I = v^2 \rho c$

- Si une source est homogène elle rayonne dans tout l'espace
- l'onde se propage sous forme d'une sphère qui s'agrandit au fur et à mesure
- l'intensité reçue sur un front d'onde s'écrit:

$$I = \text{puissance acoustique}/4\pi R^2$$

- Plus la source sonore est éloignée plus  $I$  est petit: sensation sonore plus faible

• Exemple :

à la distance 1m ( $R=1$ ) d'une source  $I = W/S = W/4\pi R^2 = W/4\pi$

à 2m de la source ( $R=2$ )  $I' = W/S' = W/4\pi 2^2 = I/4$

## NIVEAU SONORE (qualité physiologique) : LE DÉCIBEL

Chez l'humain: Fréquences audibles de 16 à  $\approx 20\,000\text{ Hz}$

Pour une fréquence de 1000 Hz :

- le son le plus faible perceptible: seuil d'audibilité  $\rightarrow I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  ( $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ )
- le son le plus puissant toléré: seuil de douleur  $\rightarrow I_M = 1 \text{ W/m}^2$  ( $P_S = 20 \text{ Pa}$ )

Grand intervalle des puissances audibles  $\rightarrow$  échelle logarithmique

Niveau sonore  $S_A \rightarrow$  comparaison de  $I$  reçue à  $I_0$  (référence):

$$S_A = \log_{10}(I/I_0) (\text{Bel}) = 10 \log_{10}(I/I_0) (\text{decibel})$$

Grandeur sans dimension mais  $\rightarrow$  décibels absolus.

$$S_A = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} (\text{décibel})$$

Seuil d'audibilité  $\rightarrow$  Intensité sonore réelle  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

$\rightarrow$  produit un son de  $S_0 = 0\text{ dB}$ .

Seuil de douleur  $\rightarrow$  intensité sonore réelle  $I_M = 1 \text{ W/m}^2$

$\rightarrow$  produit un son de  $S_M = 120 \text{ dB}$ .

Niveau sonore global produit par plusieurs sources en même temps : on additionne les  $I$  et on calcule le niveau sonore  $S_A$ .

(Voir exemple Diapo page 18)

## IMPEDANCE ACOUSTIQUE: Z

$Z$  d'un milieu, pour une onde sonore, traduit sa résistance au passage à cette onde :

$$Z = \frac{P}{v} = \rho c \text{ (g/cm}^2 \cdot \text{s ou Kg/m}^2 \cdot \text{s : rayls)}$$

$Z$  est caractéristique du milieu ex.:

Pour : l'air  $0,04 \cdot 10^3 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$

l'eau  $148 \cdot 10^3 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$

l'os  $780 \cdot 10^3 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$

Quand une onde acoustique passe d'un milieu à un autre, d'impédance acoustique différente, elle ne transmet pas toute son énergie:  $W_i = W_r + W_t$

Propagation du son d'un milieu d'impédance  $Z_1$  à un milieu d'impédance  $Z_2$

On définit :

$$R = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 = \frac{W_r}{W_i} \text{ c'est le coefficient de réflexion énergétique ou pouvoir réflecteur}$$

$$T = \frac{4 Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} = \frac{W_t}{W_i} = \text{coefficient de transmission énergétique ou pouvoir de transmission}$$

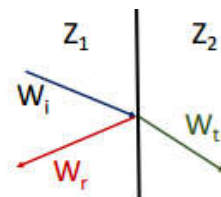
$R + T = 1$ : l'énergie est conservée

Si  $Z_1 = Z_2$ :  $R = 0$  pas de réflexion, pas de perte d'énergie

$T = 1$  toute l'énergie est transmise

Plus  $|Z_1 - Z_2|$  augmente plus  $R$  augmente et  $T$  diminue

(Voir exemple Diapo page 21)



### Applications:

La mesure de l'impédance au niveau tympan permet de réaliser deux tests :

- la tympanométrie qui étudie la souplesse du tympan et des osselets
- la recherche des réflexes stapédiens (rôle protecteur contre les bruits intenses)

### QUALITES PHYSIOLOGIQUES DES SONS :

- HAUTEUR D'UN SON: GRAVE OU AIGU
- INTENSITÉ OU SONIE: FORT OU FAIBLE
- TIMBRE: ORIGINE

### HAUTEUR OU TONIE D'UN SON,

#### Définition:

- Qualité physiologique liée à la fréquence
- Plus la fréquence est élevée, plus le son est aigu
- la hauteur d'un son complexe dépend de celle du son fondamental
- Domaine audible pour les humains:
  - 16 à 20000 Hz
  - diminue avec l'âge et devient  $< 12000\text{Hz}$
- Pour les autres espèces animales:
  - $>20000\text{ Hz}$  Ultrasons: Chauve souris
  - $<16\text{ Hz}$ : infra-sons: Éléphants
- Un même son peut être produit avec des hauteurs différentes ( $\pm$  grave)
- Pour un même son et avec la même intensité sonore, le seuil différentiel de hauteur correspond à:

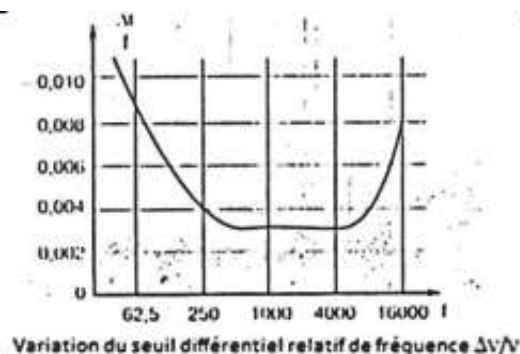
la plus petite différence de fréquence  $\Delta_v$  donnant une sensation de hauteur différente

le seuil différentiel de hauteur dépend de:

- sujet: sensibilité du sujet
- l'intensité sonore: pour les sons faibles le seuil est élevé
- la fréquence:  $\Delta_v$  augmente quand la fréquence augmente

#### Seuil différentiel relatif de hauteur :

- $\Delta_v$  augmente quand la fréquence augmente
- le rapport  $\Delta_v / v$  , seuil différentiel relatif de hauteur reste pratiquement constant pour les fréquences entre 500 et 8000Hz



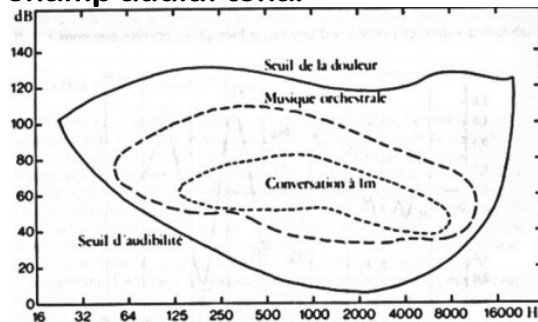
## NIVEAU SONORE OU SONIE :

### Définition :

- Qualité physiologique du son permettant de dire s'il est  $\pm$  fort
- Liée à la puissance sonore
- Varie en fonction de la fréquence

### Aire de l'audition :

- Pour chaque fréquence on cherche: le seuil d'audibilité, le seuil de sensation douloureuse
- On trace les courbes de variation des seuils en fonction des fréquences
- Entre les deux: **champ auditif tonal**



### Seuil différentiel de sonie $\Delta I_s$ :

- Pour une même fréquence, c'est la plus petite différence permettant une sensation de sonie différente
- $\Delta I_s$  augmente quand  $I$  augmente

### Seuil différentiel relatif de sonie $\Delta I_s / I$

- $\Delta I_s / I = \text{cte}$  dans le domaine de fréquences des conversations normales et dans un domaine de puissance acoustique moyen (ni trop fort ni trop faible)
- Pour  $\nu = 1000\text{Hz}$  cte = 0,2

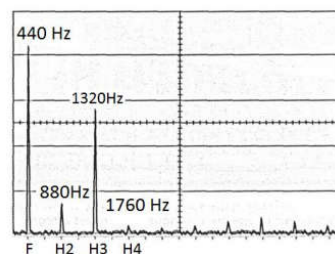
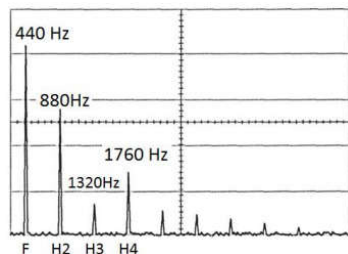
## TIMBRE: ORIGINE D'UN SON :

• Définition: pour une même hauteur et une même sonie,

Le timbre est la qualité physiologique qui permet de reconnaître deux sons émis par deux instruments différents, la voix d'une personne...

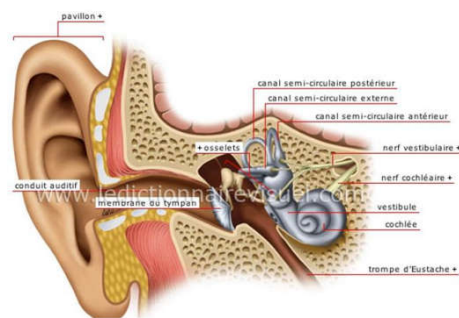
• En général, un son = un son fondamental + un certain nombre de ses harmoniques

- avec la même composition en harmoniques: amplitudes  $\neq \Rightarrow$  timbres  $\neq$





## DESCRIPTION ÉLÉMENTAIRE DE L'OREILLE HUMAINE



### L'OREILLE EXTERNE :

Elle comprend :

- Le pavillon qui recueille les ondes sonores
- Le conduit auditif externe, qui conduit les ondes jusqu'au tympan

### L'OREILLE MOYENNE (cavité remplie d'air)

Elle comprend:

- Le tympan, membrane élastique et de forme conique qui transmet la vibration
- Une caisse contenant les osselets qui amplifient l'onde sonore → assurer une adaptation entre oreille externe (milieu aérien) et oreille interne (milieu aqueux)
- La trompe d'eustache met en communication l'oreille moyenne et le pharynx et équilibre la pression à l'intérieur de l'oreille

### L'OREILLE INTERNE :

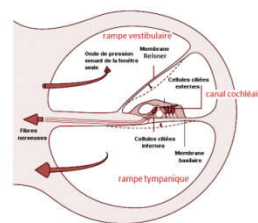
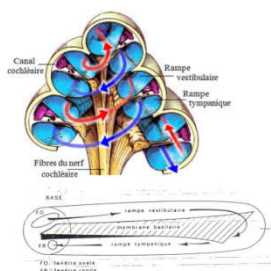
Elle comprend:

- le vestibule et des canaux semi-circulaires, organes d'équilibration
- la cochlée, organe d'audition, est un tube  $\approx 30$  mm de long, enroulé en spirale sur 3,5 tours. Elle comprend:
  - La rampe vestibulaire, remplie d'un liquide incompressible, la périlymphe.
  - le canal cochléaire rempli d'endolymphe
  - La rampe tympanique est remplie de périlymphe
  - la membrane de Reissner, sépare la rampe vestibulaire et le canal cochléaire.
  - la membrane basilaire dont les cellules ciliées forment l'organe de CORTI.

Le mouvement de la périlymphe provoque des oscillations de la membrane basilaire et un mouvement des cils → L'énergie mécanique se transforme en énergie électrique c'est la transduction

### DETAIL DE LA COCHLEE :

DETAIL DE LA COCHLEE



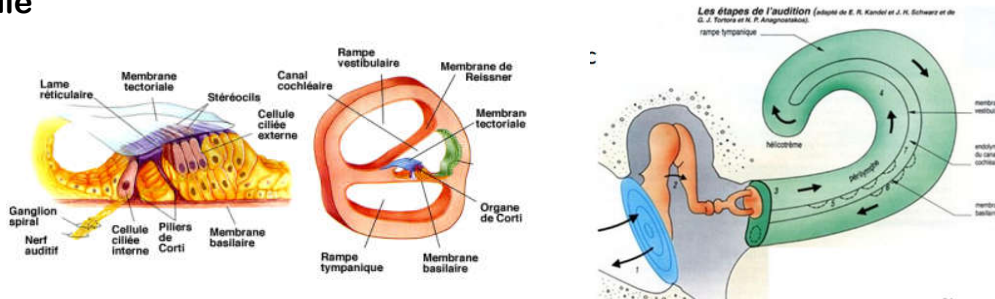
Source: Rabbitts et Schenck, 1985.

## DÉTAIL DE L'OREILLE MOYENNE ET DE L'OREILLE INTERNE ET TRANSDUCTION

La transduction s'effectue dans l'organe de Corti.

Le déplacement des cils des cellules ciliées produit une dépolarisation rapide des cellules.

Le déplacement des cils dans l'autre direction provoque la repolarisation de la cellule

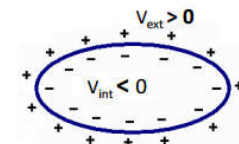


### POTENTIEL ÉLECTRIQUE D'UNE CELLULE :

#### ■ Potentiel de repos :

##### ➤ à l'intérieur de la cellule:

- Ions  $\ominus$  et  $\oplus$  essentiellement  $K^+$
- charge globale très légèrement négative.
- Répartition de charges négatives en excès sur la face interne de la membrane.
- Potentiel de membrane  $V_{int}$  est négatif et uniforme.



##### ➤ à l'extérieur de la cellule:

- Ions  $\oplus$  et  $\ominus$  essentiellement du  $Na^+$
- Répartition d'ions  $\oplus$  sur la face externe de la membrane, par effet électrostatique.
- Potentiel de membrane  $V_{ext}$  est positif et uniforme.

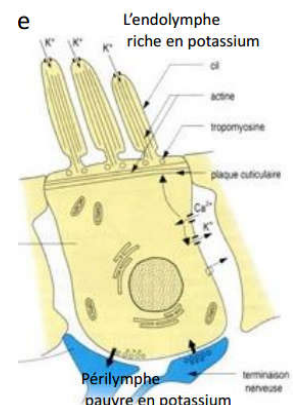
##### ➤ entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule une ddp: $V_{int} - V_{ext}$ toujours $< 0$

### Potentiel d'action d'une cellule (PA):

- Concerne les cellules excitables
- Ce sont les changements que subit le potentiel de base suite à une variation brusque de la répartition ionique de part et d'autre de la membrane cellulaire :
  - Excitation suffisante → Variation brutale de la répartition des ions
  - Entrées et sorties de  $Na^+$ ,  $K^+$ , et  $Ca^{2+}$ .
  - Inversion de la polarité de la membrane = dépolarisation de la membrane
  - La dépolarisation se propage et se transmet le long de la membrane

## DÉTAIL D'UNE CELLULE CILIÉE AVEC MOUVEMENT DES IONS ET POTENTIEL D'ACTION

1. Mouvement des cils → entrée de  $K^+$  par la partie apicale
2. début de dépolarisation → entrée de  $Ca^{2+}$
3. La dépolarisation continue et l'entrée de  $Ca^{2+}$  entraîne:
4. la libération de neurotransmetteurs → influx nerveux
5. et l'ouverture de canaux à  $K^+$  à la base des cellules
6. Sortie de  $K^+$  → repolarisation de la cellule





## EXPLORATION FONCTIONNELLE DE L'AUDITION : PRINCIPAUX TYPES DE SURDITÉ OU HYPO-ACOUSIE

- Surdité de transmission
  - Liée au conduit auditif, au tympan ou à la chaîne des osselets
  - Peut être remédiée par: appareil auditif ou chirurgie
- Surdité de perception
  - Liée à l'oreille interne.
  - difficilement accessible à la chirurgie.
  - Peut être remédiée par: prothèses auditives à fréquence et intensité variable.
- Surdité de conduction nerveuse
  - Compression du nerf auditif
  - Lésion nerveuse ...
  - pas appareillable

## LES TESTS D'EXPLORATION

Acoumétrie : examen qualitatif rapide pour déceler le type d'hypoacousie

- Acoumétrie phonique :

On fait répéter au sujet des mots émis à voix basse, méthode peu précise

- Acoumétrie instrumentale( au diapason) :

Il s'agit de faire écouter plusieurs diapasons de fréquences différentes

- Un diapason émet des sons purs pouvant aller de 64 à 4096 Hz
- Le son émis par un diapason diminue progressivement d'amplitude
- Une diminution de la durée de perception d'un son est interprétée comme une hypoacousie

### Épreuve de RINNE: comparaison de CO et CA

En conduction aérienne le diapason est à 2 cm du pavillon → durée de l'audition  $t_{ca}$

En conduction osseuse, pied du diapason sur la mastoïde → durée d'audition  $t_{co}$

- oreille normale  $t_{ca}/t_{co} \approx 3$
- $t_{ca} \downarrow$  alors  $t_{ca}/t_{co} < 3$ , il y a surdité de transmission: rinne est dit négatif
- $t_{ca}$  et  $t_{co} \downarrow$  alors  $t_{ca}/t_{co} \approx 3$ , surdité de perception ou de conduction nerveuse : rinne positif



### Épreuve de WEBER:

diapason sur le front

Si le son est entendu de façon symétrique: audition normale

Si le son est latéralisé du côté sain : surdité de perception

Si le son est latéralisé du côté atteint : surdité de transmission



## Audiométrie

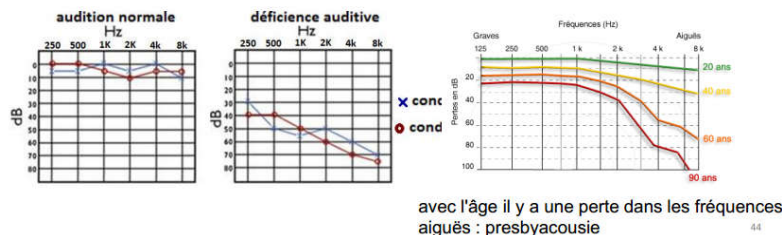
- Utilisation d'un appareil de stimulation acoustique calibré qui délivre des sons purs
- En cabine insonorisée
- En **Audiométrie Tonale liminaire** on recherche des seuils d'audibilité en CA et CO

- on délivre des sons purs à différentes fréquences (125 à 8000Hz)
- on commence par un niveau sonore faible, puis on l'augmente jusqu'à détection d'un son audible: seuils d'audibilité (seuil liminaire d'audibilité)
- Pour tester la CA les sons sont émis par des écouteurs
- pour tester la CO on place un vibreur sur la mastoïde qui envoie de minuscules vibrations à l'oreille interne, directement dans le liquide du limaçon
  - **dépistage de surdité de perception**
  - **dépistage de surdité de transmission**

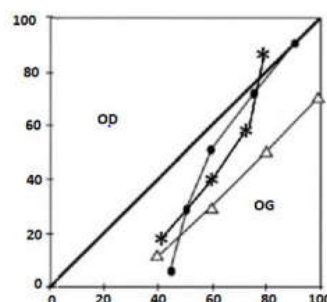


- Le résultat du test d'audiométrie Tonale liminaire

- sous forme d'un diagramme pour chaque oreille
- CO (o) et CA (x) avec des marques différentes
- on parle d'audition normale quand le seuil auditif se situe entre 0 et 30 dB



- En Audiométrie tonale supraliminaire on recherche des distorsions concernant l'intensité (recrutement) ou la hauteur (diplacousie)
- Le Test de fowler (parmi d'autres) est utilisé en cas de surdité unilatérale pour dépister un éventuel recrutement
  - Un son de même fréquence est transmis en alternance dans les deux écouteurs
  - on recherche, pour une intensité donnée dans l'oreille saine, une sensation d'égale intensité dans l'oreille malade
  - Le Test de fowler permet de dépister une lésion cochléaire



**Ressource : Diapo du professeur de Biophysique Hjiyej**

**Mise en page : Filali Mohamed (étudiant de la promotion  
médecine 2022)**