

BASES BIOPHYSIQUES DE L'AUDITION ET DES EXPLORATIONS FONCTIONNELLES AUDITIVES (aspects physiques et physiologiques)

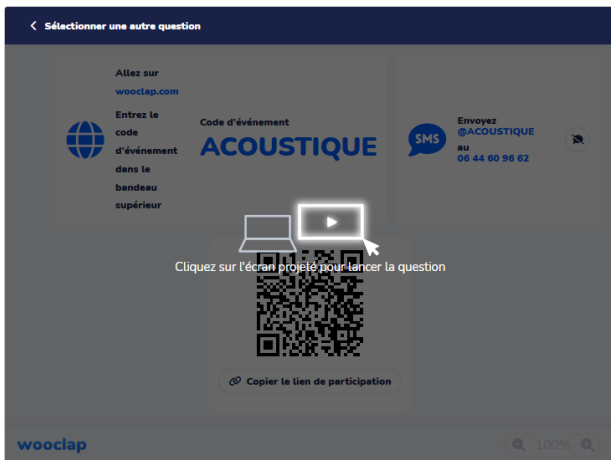
Cours de DFGSM2

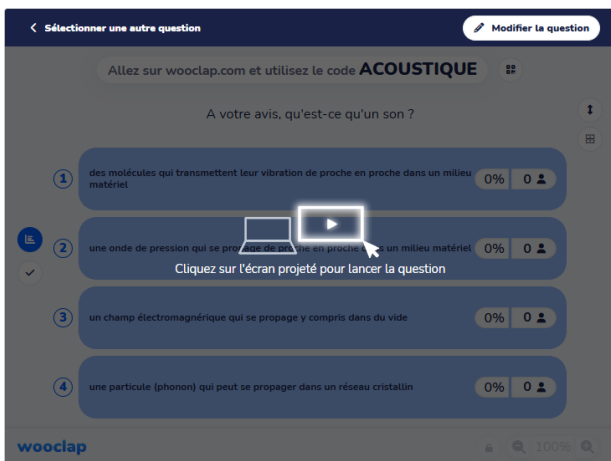
UE Système neuro-sensoriel

Faculté de médecine de Montpellier-Nîmes

denis.mariano-goulart@umontpellier.fr

Les parties sur fond rose constituent des compléments non exigibles à l'examen

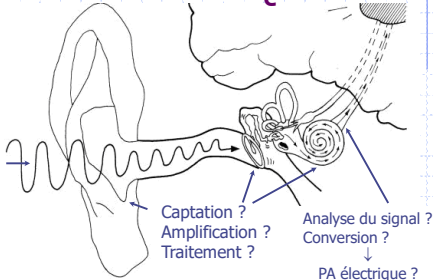




OBJECTIFS PEDAGOGIQUES

ACOUSTIQUE

Qu'est-ce qu'un son ?
Intense, aigu ?
Propagation ?



BIOPHYSIQUE DE L'AUDITION

Prérequis : cours sur les ondes de PASS ou rappels de ce cours donnés en DFGSM2.
Suite de cursus : neurophysiologie de l'audition, exploration fonctionnelle de l'audition, ORL et neurologie.

DEFINITION D'UN SON

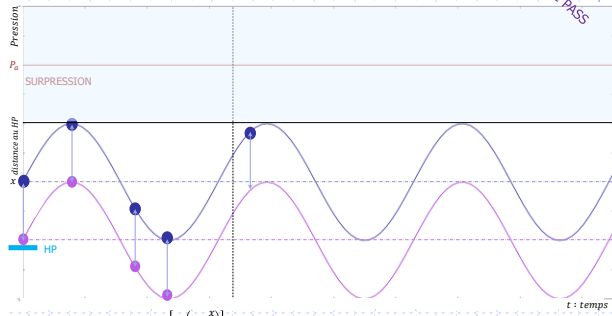
SON ≡ Onde progressive scalaire de vibration d'atomes ou molécules à la célérité c dans un milieu matériel

Rappels de PASS

$g(t, x) = g(t + T, x)$
 $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$
 période pulsation propre fréquence
 $g(t, x) = g(t, x + \lambda)$
 $\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega}$
 longueur d'onde

SON = ONDE DE PRESSION

Rappels de PASS



$c \gg x \Rightarrow g(t, x) = x + A \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \approx x + A \sin(\omega \cdot t) = x + g(t, 0)$
 mais cette hypothèse est fautive car $c_{air} \approx 343 \text{ m/s} \approx x$: les déphasages (retards) ne sont pas négligeables

Sélectionner une autre question Modifier la question

Allez sur wooclap.com et utilisez le code **ACOUSTIQUE**

Dans un gaz réel plus dense et moins compressible qu'un autre, pour une même pression acoustique et une même fréquence,

- 1 l'impédance acoustique est plus élevée 0% 0
- 2 Cliquez sur l'écran projeté pour lancer la question
les molécules vibrent à des vitesses plus faibles 0% 0
- 3 les molécules vibrent sur des amplitudes plus faibles 0% 0

wooclap

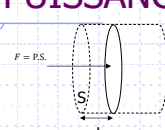
SON PRESSION IMPEDANCE CELERITE

POINT D'ETAPE 1: acoustique

- SON = onde progressive de vibration ou de pression car déphasage des mouvements vibratoires
- Onde de pression : $P=Z.v$
- $Z = \rho.c = 1/(\chi.c)$
- $Z_{\text{eau}} \gg Z_{\text{air}}$
- $c_{\text{eau}} \approx 1500 \text{ m/s} \gg c_{\text{air}} \approx 340 \text{ m/s}$

SON PRESSION IMPEDANCE CELERITE **PUISSANCE** REFLECTION INTENSITE SIMULEUR INTERACTION AMBIANCE EXTERIEUR MOYENNE BATEME

PUISSANCE SURFACIQUE



$$dL \stackrel{DEF}{=} F \cdot dx = P \cdot S \cdot dx$$

$$W \stackrel{DEF}{=} \frac{1}{S} \frac{dL}{dt} = P \cdot \frac{dx}{dt} = P \cdot v = \frac{P^2}{Z} \text{ car } P = Z \cdot v$$

Puissance surfacique W en Watt/m² : $W(t) \stackrel{DEF}{=} \frac{1}{S} \frac{dL(t)}{dt} = \frac{P^2(t)}{Z}$

Pour un son pur : $\langle W \rangle = \frac{\langle P^2 \rangle}{Z} = Cste \cdot Z \cdot A^2 \cdot f^2$
en notant $\langle \rangle$ la moyenne sur T

$$\langle P^2 \rangle = Z^2 \cdot A^2 \cdot \omega^2 \cdot \left\langle \cos^2 \left[\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \right\rangle = Z^2 \cdot A^2 \cdot \omega^2 \int_0^T \cos^2 \left[\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \cdot dt = \frac{Z^2 \cdot A^2 \cdot \omega^2}{2} = 2 \cdot \pi^2 \cdot Z^2 \cdot A^2 \cdot f^2$$

$P \approx 20 \cdot 10^{-6} - 20 \text{ Pa} \Rightarrow W \approx 10^{-12} - 1 \text{ W/m}^2$ dans l'air

SENSATION D'INTENSITE



Stimulus physique (ex: W)
Sensation ou Perception (consciente)

L'intensité ressentie par un sujet sain (i.e. sensation ou perception) n'est pas proportionnelle au stimulus physique d'intensité W.

Ce fait est général pour les 5 sens

On observe (expérimentalement) que la plus petite variation perceptible ΔS d'un stimulus S est telle que :

$$\frac{\Delta S}{S} = k \text{ constante}$$

$$\Delta S = k \cdot S$$



Loi de E. Weber (1795-1878)

LOI de WEBER-FECHNER



G. Fechner 1801-1887

Loi de Weber et hypothèse de Fechner :

$$\Delta S = k \cdot S \Rightarrow \Delta P = k' , \text{ donc:}$$

$$\Delta S = k \cdot S \Rightarrow \Delta P = k' = \frac{k' \Delta S}{k S} = K' \cdot \frac{\Delta S}{S}$$

$$\Rightarrow \Delta P = K' \cdot \Delta(\ln S) = K' \cdot \ln(10) \cdot \Delta(\log_{10} S) = K \cdot \Delta(\log_{10} S)$$

$$\Rightarrow P_1 - P_0 = K \cdot (\log_{10} S_1 - \log_{10} S_0)$$

$$P = K \cdot \log_{10} S \quad \text{Loi de Weber-Fechner}$$

Perception (ex: intensité sonore)

Stimulus physique (ex: puissance surfacique)

La réponse des organes des sens est logarithmique

INTENSITE SONORE

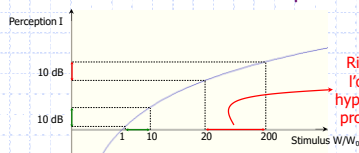
$$I = K \cdot \log W \Rightarrow I(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{W}{W_0} \right) \text{ où } W_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

W_0 = seuil d'audition à 1 kHz. $W = W_0 \Rightarrow I = 0$ dB.

$W/W_0 = 1 \cdot 10^{12} \Rightarrow I = 0$ dB à 120 dB

$$I_2 - I_1 = 10 \text{ dB} = 10 \cdot \log_{10} (W_2/W_1) \Rightarrow W_2 = 10 \cdot W_1$$

Le même incrément de 10 dB décuple W.



Sélectionner une autre question Modifier la question

Allez sur wooclap.com et utilisez le code **ACOUSTIQUE**

Si on entend un son à une certaine intensité en utilisant les deux enceintes identiques d'une chaîne HI-FI, débrancher une de ces deux enceintes fait entendre ...

1 OUI 0% 0

2 NON 0% 0



Cliquez sur l'écran projeté pour lancer la question

wooclap 100%

HAUTEUR SONORE

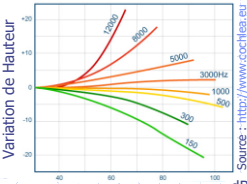
$H = K \cdot \log f \Rightarrow H(\text{Savart}) = 1000 \cdot \log_{10} f$

Un sujet normal peut distinguer environ 1500 hauteurs.

La sensation de hauteur dépend aussi de l'intensité :

- aigus ($f > 3 \text{ kHz}$) perçus plus hauts (plus aigus) si I augmente
- graves ($f < 1 \text{ kHz}$) perçus moins hauts (plus graves) si I augmente

Tonie de 1000 mels
= Hauteur de 1000 Hz
à 40 dB

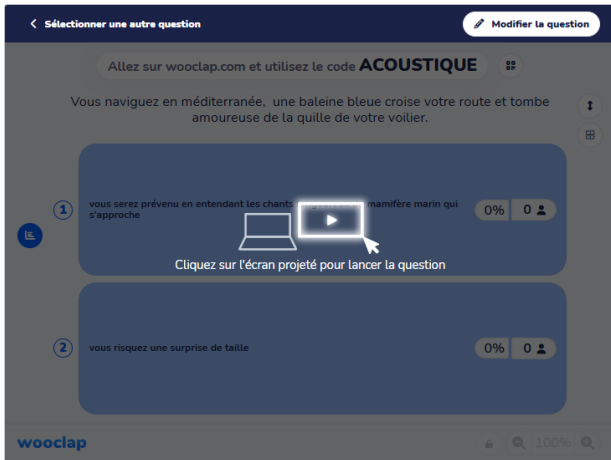


Source : <http://www.cochlea.eu>

Timbre = caractéristiques hors intensité, hauteur, durée

POINT D'ETAPE 2 : quantification

- Stimulus physique $S \neq P$ Perception
 - Stimuli : W pour l'intensité, f pour la hauteur
- La perception dépend de plusieurs stimuli
- Loi de Weber : $\Delta S/S = k$
- Loi de Weber-Fechner : $P = K \cdot \log S$
- Intensité sonore (dB) : $I = 10 \cdot \log_{10}(W/W_0)$
 - dépend aussi de f : sonie N phones = N dB à 1 kHz
- Hauteur sonore (Savart) : $H = 1000 \cdot \log_{10} f$
 - Sensation aigu/grave renforcée si I augmente :
 - tonie N mels = N Hz à 40 dB

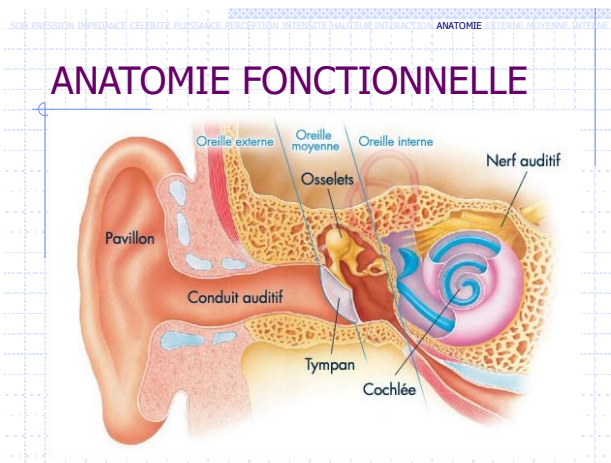


INTERACTION

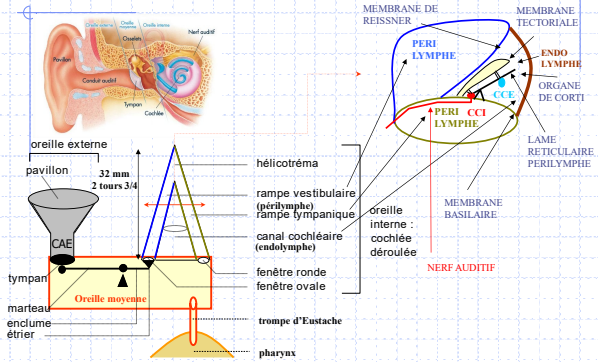
POINT D'ETAPE 3 : interactions

- Absorption qui augmente avec la fréquence
- Diffraction qui baisse avec la fréquence
- Réflexion quasi complète d'un son à une interface entre de l'air et de l'eau

$$r = \frac{\langle W_r \rangle}{\langle W_i \rangle} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} = 1 - t$$

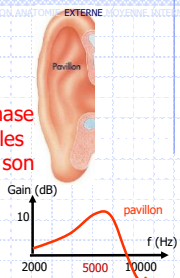


ANATOMIE FONCTIONNELLE



OREILLE EXTERNE

Elle transforme l'onde en amplitude et phase en fonction de ses fréquences, ainsi que les surfaces d'ondes, de manière à guider le son vers le tympan.

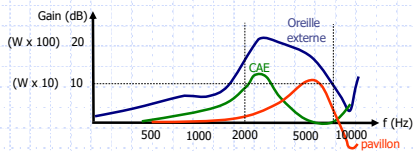
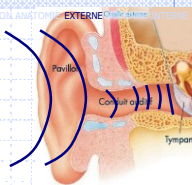


- Pavillon
 - Recueil des ondes sonores
 - Amplification variable avec la fréquence du son
 - Localisation de la source sonore
 - Avant/arrière et Haut/Bas : analyse de la diffraction par les reliefs cartilagineux du pavillon.

Rm:
 - Localisation D/G : par la différence d'intensité (si $f > 1500$ Hz) ou de phase entre les 2 oreilles.
 - Éloignement de la source : analyse du spectre (diffraction des graves) et de l'écho.

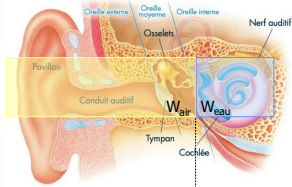
OREILLE EXTERNE

- Pavillon :
 - Recueil, amplification, localisation
- Conduit auditif externe
 - Ondes sphériques → planes sur le tympan
 - Amplification si $f \approx 2-3$ kHz



Oreille externe : amplification autour de 2-7 kHz.

OREILLE MOYENNE



$$W_{air} = P_{air} \cdot v_{air}$$

$$W_{eau} = P_{eau} \cdot v_{eau}$$

A-t-on ? :

$$W_{air} = W_{eau}$$

	AIR	EAU
$Z=P/v$	↓ ↓	↑ ↑
Pressions	↓	↑
v vibration	↑	↓

Adaptation d'impédance:

l'oreille moyenne doit
 ↑ les pressions et ↓ les
 vitesses (sinon 99.9% de réflexion)

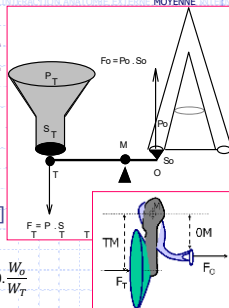
OREILLE MOYENNE

$$(TM) \cdot F_T = (OM) \cdot F_O$$

$$\Rightarrow (TM) \cdot P_T \cdot S_T = (OM) \cdot P_O \cdot S_O$$

$$\frac{P_O}{P_T} = \frac{TM \cdot S_T}{OM \cdot S_O} = [2; 6] \frac{60}{3} \approx [40; 120]$$

Levier + surfaces ⇒ Ampli : P x [40;120]



$$P^2 = Z \cdot W \Rightarrow \left(\frac{P_O}{P_T}\right)^2 = \frac{Z_O \cdot W_O}{Z_T \cdot W_T} = \frac{1,57 \cdot 10^6}{446} \cdot \frac{W_O}{W_T} = 3520 \frac{W_O}{W_T}$$

Pour n'avoir aucune perte : $W_O = W_T \Rightarrow P_O = \sqrt{3520} \cdot P_T = 59 \cdot P_T$

ce qui correspond à une amplification de $10 \cdot \log_{10} 59^2 = 35 \text{ dB}$ pour avoir $W_O = W_T$

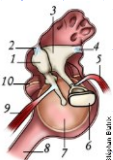
Expérimentalement, sans osselets, écart des seuils os/air : 33 dB

Le modèle estime une amplification de $\frac{10 \cdot \log_{10} [40; 120]^2}{10 \cdot \log_{10} 80^2} = \frac{[32; 41] \text{ dB}}{38 \text{ dB}}$

OREILLE MOYENNE

- Adaptation d'impédance + 35 dB
 - + 30-35 dB en ↑ P et ↓ v
 - Principalement 2 actions : levier, surfaces ± cône du tympan ?

- Rôles des muscles de l'oreille moyenne :

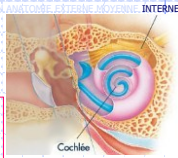


- muscle tenseur du tympan (marteau; trébuchet V^{m_3})
 - audition des BF (20-200 Hz)
- muscle de l'étrier = stapedius (innervation : facial VII)
 - Protection limitée de l'oreille interne (réflexe stapédien)
 - -10 dB si I > 80 dB, f < 2kHz; pendant 3 min; délai 30 ms
 - Filtrage (accommodation) : ↓ transmission si f < 2 kHz

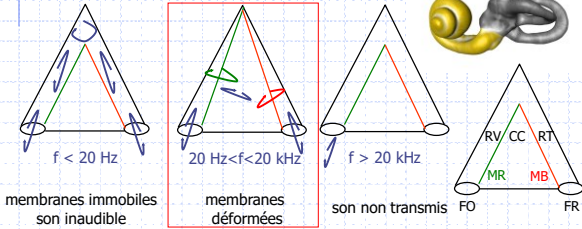
- Conséquence : Paralysie faciale ⇒ hyperacousie

OREILLE INTERNE

Rôle : convertir une onde mécanique en onde électrique et adresser les PA sur les nerfs adéquats.

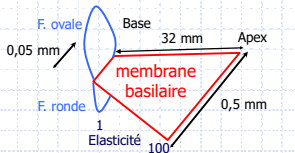


- Mouvements des fluides et des fenêtres

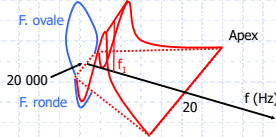


OREILLE INTERNE

- Mouvements de la membrane basilaire



L'onde de vibration subit un **amortissement critique** après un maximum de déformation de la membrane basilaire.

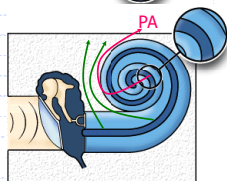
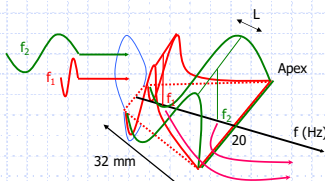
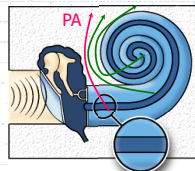


La position de ce **maximum** est d'autant plus proche de l'**apex** que la fréquence du son est **basse**.

OREILLE INTERNE

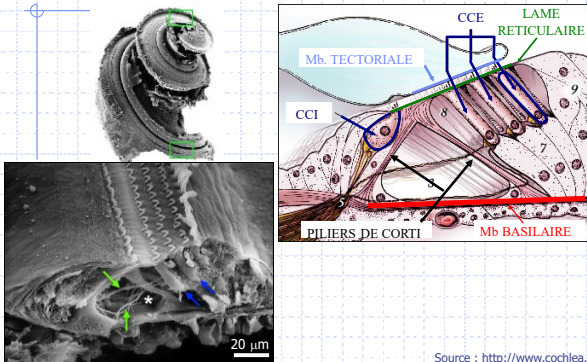
- Mouvements de la membrane basilaire

Difficulté : 1500 hauteurs discernables, donc $L \approx 32/1500 = 0,02$ mm $L \approx 20 \mu\text{m}$, incompatible avec la structure de la membrane basilaire



Source : <http://www.cochlea.eu>

OREILLE INTERNE

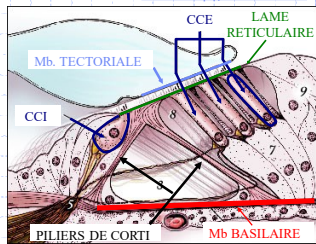


Source : <http://www.cochlea.eu>

OREILLE INTERNE

Source : <http://www.cochlea.eu>

- Abaissement Mb. basilaire
- ↓
- Glissement L. réticulaire sous la Mb. tectoriaie
- ↓
- Cisaillage des cils
- ↓
- Inhibition des CCE adjacentes au maximum
- ↓
- Dépolarisation CCE au niveau du maximum
- ↓
- Amplification à f de la vibration



- Ampli. des vibrations
- ↓
- Dépolarisation des CCI
- ↓
- Potentiel d'action
- 3 relais du TC → Thalamus → Cortex

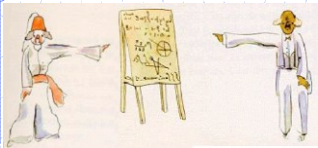
POINT D'ETAPE 4 : Audition

- O. externe : Recueil
 - amplification, Onde plane, localisation
- O. moyenne : Passage air → eau
 - Adaptation d'impédance ($P\uparrow$; $v\downarrow$): levier, S_T/S_O , courbe S_T
 - Protection, accommodation (\downarrow BF)
- O. interne : Transduction et analyse
 - Analyse en fréquence par la Membrane Basilaire
 - Transduction au niveau des cellules ciliées internes

BIBLIOGRAPHIE

- Acoustique :
 - Physique pour les sciences de la vie. Tome 3. Les ondes. A. Bouyssy, M. Davier et B. Gatty. Belin. Dia Université.
- Biophysique sensorielle :
 - Physique et biophysique (PCEM), tome 3, biophysique sensorielle. M. Burgeat, Y. Grall et D. Loth. Masson. 1973.
- Audition :
 - <http://www.cochlea.eu>





Merci pour votre attention...

denis.mariano-goulart@umontpellier.fr
<http://scinti.edu.umontpellier.fr/enseignements/cours/>
