

**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

---

---

---

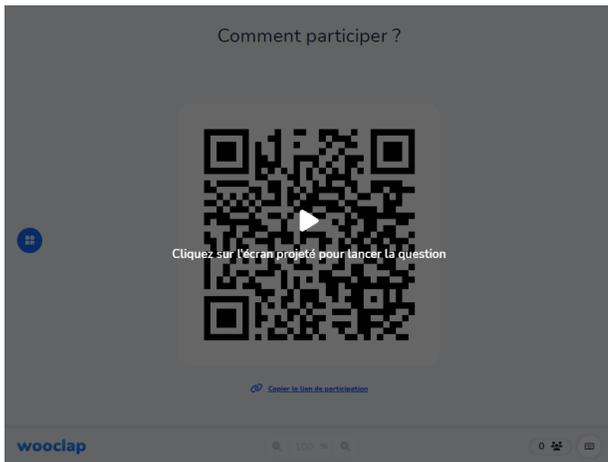
---

---

---

---

---



---

---

---

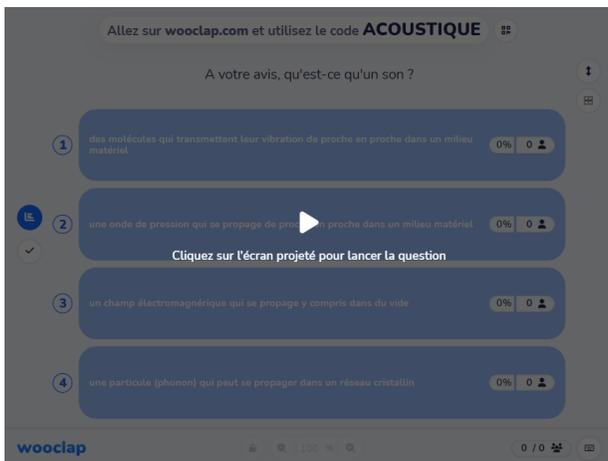
---

---

---

---

---



---

---

---

---

---

---

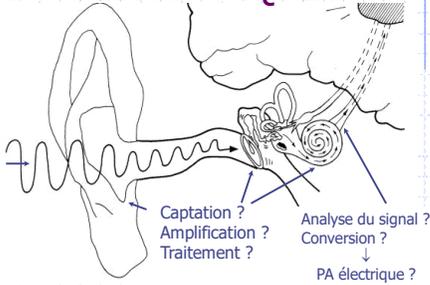
---

---

## 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 du cursus : neurophysiologie de l'audition, exploration fonctionnelle de l'audition, ORL et neurologie.

---

---

---

---

---

---

---

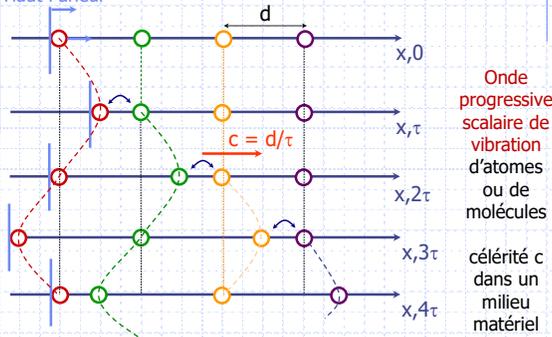
---

---

---

## DEFINITION D'UN SON

Haut-Parleur



Rappels de PASS

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## MODELISATION

- Position d'une particule  $g(t,x)$  :

$$g(t,0) = A \sin[\omega \cdot t] \Rightarrow g(t,x) = x + A \sin \left[ \omega \cdot \left( t - \frac{x}{c} \right) \right] = x + E(t,x)$$

- Période (temporelle) :  $g(t,x) = g(t+T,x)$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$$

- Longueur d'onde :  $g(t,x) = g(t,x+\lambda)$

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega}$$

Rappels de PASS

---

---

---

---

---

---

---

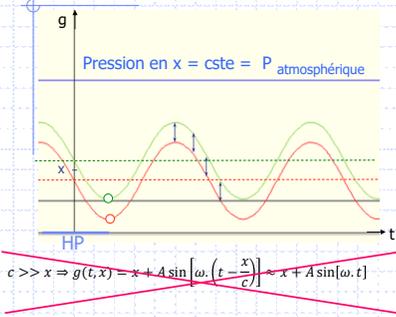
---

---

---

# SON = ONDE DE PRESSION

Rappels de PASS



Hypothèse  $c \gg x$ ,  
 $\Rightarrow$  retard =  $x/c \rightarrow 0$   
 $\downarrow$   
 vibrations en phase,  
 écarts conservés,  
 densité constante,  
 pression constante.  
  
 Or dans l'air,  
 $c \approx 343$  m/s  
 $\downarrow$   
 $c \approx x$   
 l'hypothèse  $c \gg x$   
 est fautive

---

---

---

---

---

---

---

---

---

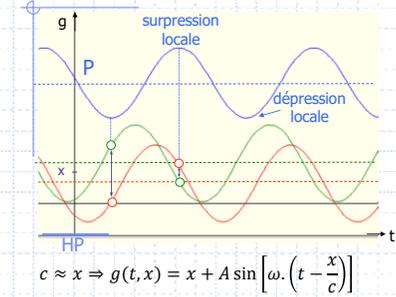
---

---

---

# SON = ONDE DE PRESSION

Rappels de PASS



déphasage des ondes  
 de vibration au  
 voisinage d'un lieu x  
 $\downarrow$   
 onde de surpression  
 acoustique P qui s'ajoute  
 à la pression ambiante.  
  
 Ordres de grandeur  
 dans l'air :  $P_a = 10^5$  Pa  
 $P = 20 \mu\text{Pa} - 20$  Pa  
 $P \ll P_a$   
 dans l'eau :  $P < \text{kPa}$

---

---

---

---

---

---

---

---

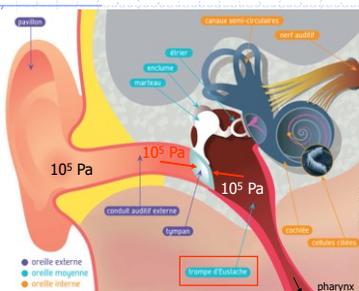
---

---

---

---

# ONDE DE PRESSION : Conséquence



Différence de pression de part et d'autre  
 du tympan  $\Rightarrow$  hypoacousie & douleur




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

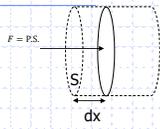
---

---





# 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/m<sup>2</sup> :  $W(t) \stackrel{DEF}{=} \frac{1}{S} \frac{dL(t)}{dt} = \frac{P^2(t)}{Z}$

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

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

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

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

# SENSATION D'INTENSITE



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  $\Delta S$  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)

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

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

# LOI de WEBER-FECHNER



Loi de Weber et hypothèse de Fechner :

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

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

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

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

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

Perception (ex: intensité sonore)  $\leftarrow$   $\rightarrow$  Stimulus physique (ex: puissance surfacique)

**La réponse des organes des sens est logarithmique**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---





## 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

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## INTERACTIONS (cf. US de DFGSM2)

- Propagation : en ligne droite si  $Z = \text{cste}$
- Absorption :  $\langle W \rangle(x) = \langle W \rangle_0 \cdot e^{-(k \cdot f^n) \cdot x}$ 
  - $n \in [1, 2]$ ;  $n=2$  pour l'eau et les cristaux,
  - donc l'absorption augmente avec la fréquence
- Diffraction :  $\downarrow$  si  $\lambda \ll \varnothing$  car  $\sin \theta = \lambda / \varnothing$ 
  - Cf. cours de PACES : diffraction  $\downarrow$  si  $f=c/\lambda$   $\uparrow$  (US)
- Réflexion & réfraction :  $\frac{1}{c_1} \sin \theta_1 = \frac{1}{c_2} \sin \theta_2$

---

---

---

---

---

---

---

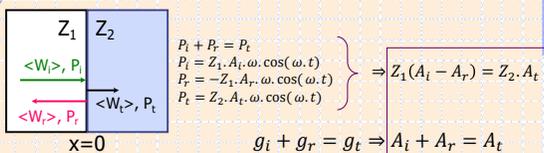
---

---

---

Pour les curieux, etc.

## REFLEXION / REFRACTION NORMALE



Comme pour un son pur,  $\langle W \rangle = \text{Cste} \cdot Z \cdot A^2$

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

$$t = 1 - r = \frac{\langle W_t \rangle}{\langle W_i \rangle} = \frac{4 \cdot Z_2 \cdot Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

$$\Rightarrow A_i - A_r = \frac{Z_2}{Z_1} A_t$$

$$= \frac{Z_2}{Z_1} (A_i + A_r)$$

$$\Rightarrow 1 - \frac{A_r}{A_i} = \frac{Z_2}{Z_1} \left(1 + \frac{A_r}{A_i}\right)$$

$$\Rightarrow 1 - \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{A_r}{A_i} \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right)$$

$$\Rightarrow \frac{A_r}{A_i} = \frac{1 - \frac{Z_2}{Z_1}}{1 + \frac{Z_2}{Z_1}} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

---

---

---

---

---

---

---

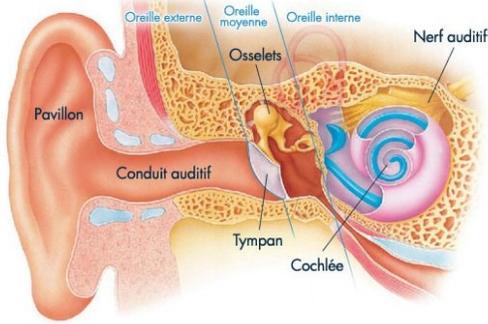
---

---

---



# ANATOMIE FONCTIONNELLE




---

---

---

---

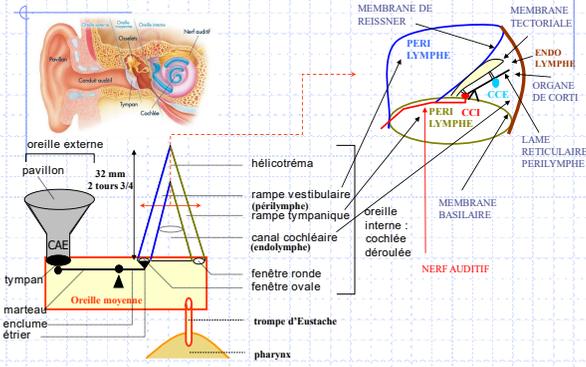
---

---

---

---

# ANATOMIE FONCTIONNELLE




---

---

---

---

---

---

---

---

# OREILLE EXTERNE

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



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

---

---

---

---

---

---

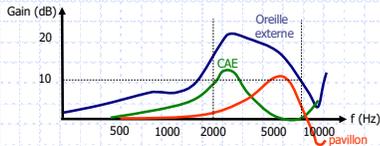
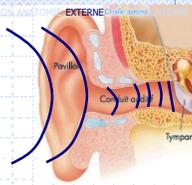
---

---

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.

---

---

---

---

---

---

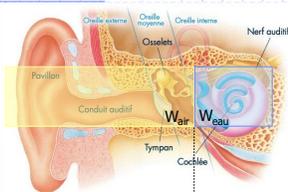
---

---

---

---

# 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

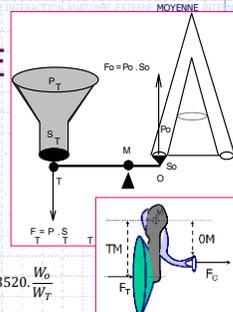
$$(TM) \cdot F_T = (OM) \cdot F_0$$

$$\Rightarrow (TM) \cdot P_T \cdot S_T = (OM) \cdot P_0 \cdot S_0$$

$$\frac{P_0}{P_T} = \frac{TM \cdot S_T}{OM \cdot S_0} \approx 1,3 \times 17,2$$

$$= 22,4$$

Levier + surfaces ⇒ Ampli :  $P \times 22,4$



$$P^2 = Z \cdot W \Rightarrow \left(\frac{P_0}{P_T}\right)^2 = \frac{Z_0}{Z_T} \frac{W_0}{W_T} = \frac{1,57 \cdot 10^6}{446} \frac{W_0}{W_T} = 3520 \frac{W_0}{W_T}$$

$W_0 = W_T \Rightarrow P_0 = \sqrt{3520} \cdot P_T = 59 \cdot P_T$   
ce qui correspond à une amplification de  $10 \cdot \log_{10} 59^2 = 35$  dB (exp : 33 dB)

Une amplification complémentaire de  $\times 2,6$  ( $22,4 \times 2,6 = 58$ ) est apportée par la variation d'incurvation des parois du cône du tympan

---

---

---

---

---

---

---

---

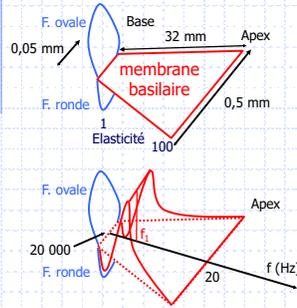
---

---



# 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**.

---

---

---

---

---

---

---

---

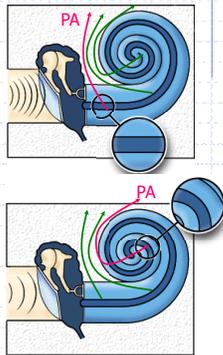
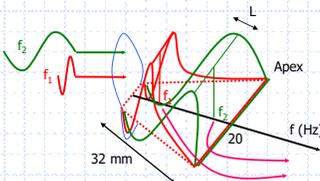
---

---

# OREILLE INTERNE

- Mouvements de la membrane basilaire

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



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

---

---

---

---

---

---

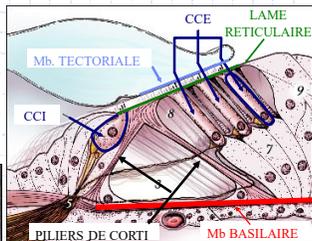
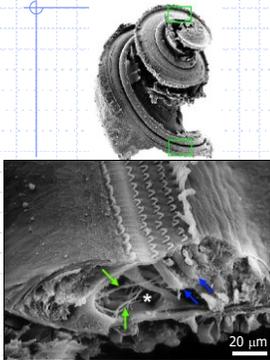
---

---

---

---

# OREILLE INTERNE



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

---

---

---

---

---

---

---

---

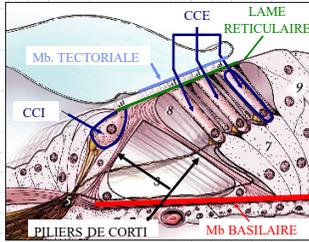
---

---

# 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
- ↓
- Déformation de l'organe de Corti



- Ampli. des vibrations
- ↓
- Dépolarisation des CCI
- ↓
- Potentiel d'action

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

# 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>




---

---

---

---

---

---

---

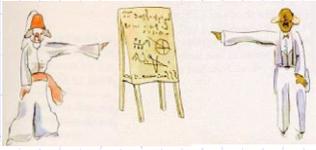
---

---

---

---

---



Merci pour votre attention...

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

---

---

---

---

---

---

---

---