

L'OREILLE MUSICALE

E. Kierlik

Licence Sciences et Technologies de l'UPMC

1^{er} avril 2007

I MESURE ET PERCEPTION DES SONS

- Intensité et fréquence d'un son pur.
- La loi de Weber - décibel et octave.
- Psychoacoustique : sonie et tonie.

I MESURE ET PERCEPTION DES SONS

- Intensité et fréquence d'un son pur.
- La loi de Weber - décibel et octave.
- Psychoacoustique : sonie et tonie.

II L'OREILLE : DE LA PHYSIOLOGIE À LA PHYSIQUE

- la tête (diffraction)
- l'oreille externe (amplification)
- l'oreille moyenne (adaptation)
- l'oreille interne (détection)

I MESURE ET PERCEPTION DES SONS

- Intensité et fréquence d'un son pur.
- La loi de Weber - décibel et octave.
- Psychoacoustique : sonie et tonie.

II L'OREILLE : DE LA PHYSIOLOGIE À LA PHYSIQUE

- la tête (diffraction)
- l'oreille externe (amplification)
- l'oreille moyenne (adaptation)
- l'oreille interne (détection)

III L'OREILLE SENSIBLE

- sensibilité au niveau sonore
- sensibilité à la hauteur
- effet de masque
- illusions auditives

Les équations de l'acoustique linéaire

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\chi_s \frac{\partial p}{\partial t}$$

$$p(x, t) = p_0 \cos\left(2\pi\left[\nu t - \frac{x}{\lambda}\right] + \phi\right)$$

$$v(x, t) = v_0 \cos\left(2\pi\left[\nu t - \frac{x}{\lambda}\right] + \phi\right)$$

Les équations de l'acoustique linéaire

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\chi_s \frac{\partial p}{\partial t}$$

$$p(x, t) = p_0 \cos\left(2\pi\left[\nu t - \frac{x}{\lambda}\right] + \phi\right)$$

$$v(x, t) = v_0 \cos\left(2\pi\left[\nu t - \frac{x}{\lambda}\right] + \phi\right)$$

FRÉQUENCE ET DÉPHASAGE

- fréquence ν en hertz.
- phase ϕ en radian.

Les équations de l'acoustique linéaire

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\chi_s \frac{\partial p}{\partial t}$$

$$p(x, t) = p_0 \cos\left(2\pi\left[\nu t - \frac{x}{\lambda}\right] + \phi\right)$$

$$v(x, t) = v_0 \cos\left(2\pi\left[\nu t - \frac{x}{\lambda}\right] + \phi\right)$$

FRÉQUENCE ET DÉPHASAGE

- fréquence ν en hertz.
- phase ϕ en radian.

IMPÉDANCE

- $p_0 = Zv_0$.
- $Z = \rho_0 c = \sqrt{\frac{\rho_0}{\chi_s}}$:
impédance.

Les équations de l'acoustique linéaire

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\chi_s \frac{\partial p}{\partial t}$$

$$p(x, t) = p_0 \cos\left(2\pi\left[\nu t - \frac{x}{\lambda}\right] + \phi\right)$$

$$v(x, t) = v_0 \cos\left(2\pi\left[\nu t - \frac{x}{\lambda}\right] + \phi\right)$$

FRÉQUENCE ET DÉPHASAGE

- fréquence ν en hertz.
- phase ϕ en radian.

IMPÉDANCE

- $p_0 = Zv_0$.
- $Z = \rho_0 c = \sqrt{\frac{\rho_0}{\chi_s}}$:
impédance.

INTENSITÉ

- $I = \langle pv \rangle$:
intensité acoustique
- $I = \frac{p_0^2}{2\rho_0 c}$ en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

La loi de Weber

L'accroissement d'intensité du stimulus nécessaire pour avoir une différence juste perceptible de sensation est une fraction constante de ce stimulus (argent, poids, ouïe, vue, ...).

La loi de Weber

L'accroissement d'intensité du stimulus nécessaire pour avoir une différence juste perceptible de sensation est une fraction constante de ce stimulus (argent, poids, ouïe, vue, ...).

L'OCTAVE

- progression identique de la hauteur d'un son par doublage de fréquence.
- le savart : $1000 \log\left(\frac{f_2}{f_1}\right)$.
- l'octave : à partir d'un fondamental $f_0 \rightarrow 2f_0$ (~ 300 Savarts).

POURQUOI DES ÉCHELLES LOGARITHMIQUES ?

La loi de Weber

L'accroissement d'intensité du stimulus nécessaire pour avoir une différence juste perceptible de sensation est une fraction constante de ce stimulus (argent, poids, ouïe, vue, ...).

L'OCTAVE

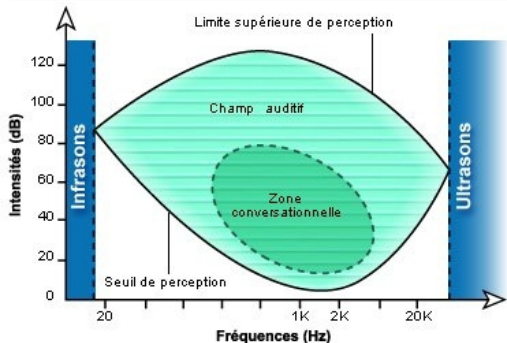
- progression identique de la hauteur d'un son par doublage de fréquence.
- le savart : $1000 \log\left(\frac{f_2}{f_1}\right)$.
- l'octave : à partir d'un fondamental $f_0 \rightarrow 2f_0$ (~ 300 Savarts).

LE DÉCIBEL

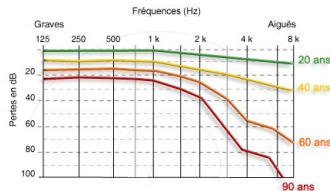
- progression identique du niveau sonore par doublage d'amplitude.
- le décibel : $10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$.
- doublage de l'intensité : + 3 dB!

L'ÉCHELLE DE PERCEPTION DE L'OREILLE HUMAINE

Limites de la sensibilité de l'oreille

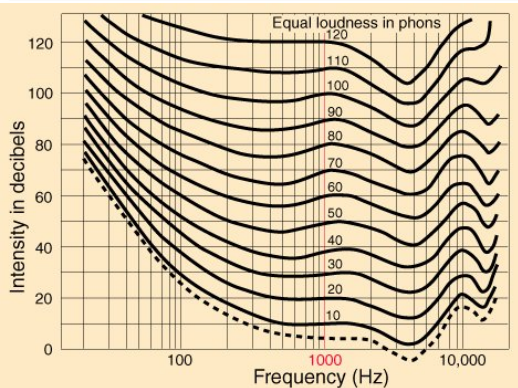


L'âge hélas !



- 20-20 000 Hz en fréquence, 0-120 dB en intensité.
- sensibilité extrême vers 4000 hz (diminue avec l'âge).
- zone moyenne : musique, conversation,...

Courbe isotonique

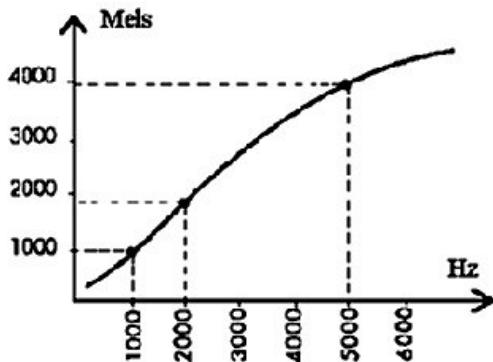


- Point de départ à 1000 Hz : sensation subjective d'intensité.
- différences entre graves et aigus : les aigus s'entendent mieux.
- → décibels A (dB-A) d'intensité perceptive.
- → timbre riche plus « sonore ».

LES ÉCHELLES SUBJECTIVES II : LA TONIE

Quelques illustrations sonores ...

Définition des mels

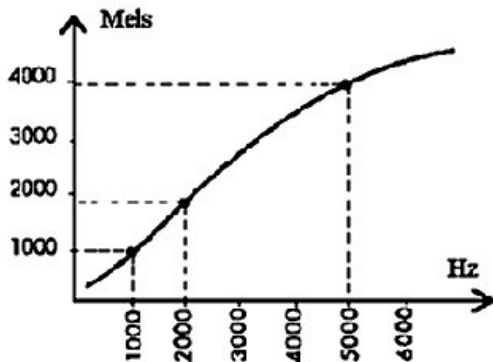


Sensation d'octave \neq doublage de fréquence pour les sons aigus.

LES ÉCHELLES SUBJECTIVES II : LA TONIE

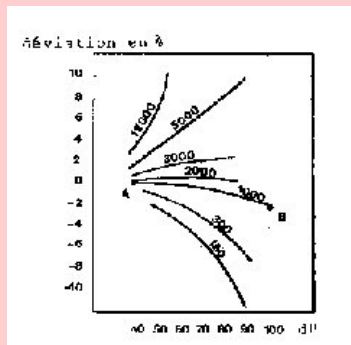
Quelques illustrations sonores ...

Définition des mels



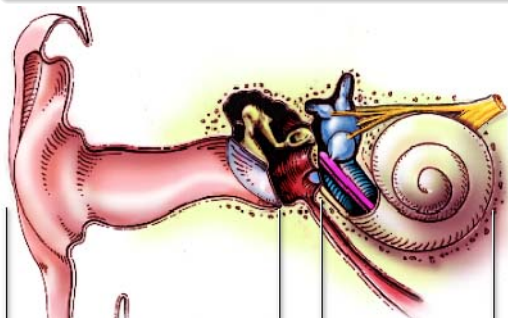
Sensation d'octave \neq doublage de fréquence pour les sons aigus.

Couplage sonie-tonie



Plus un son est fort, plus il paraît grave.

Schéma général

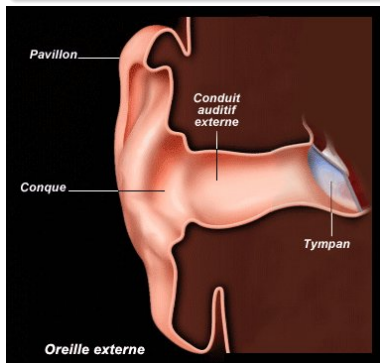


RÔLES DE L'OREILLE

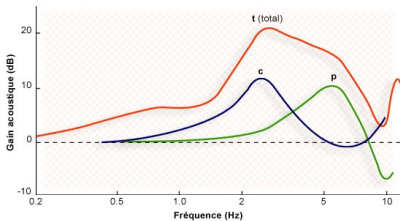
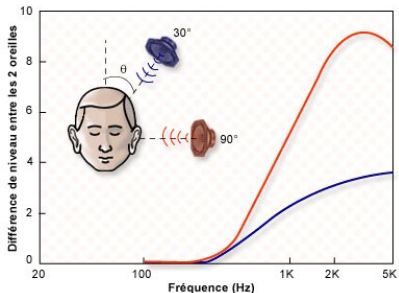
- percevoir.
- localiser.
- se protéger.

L'OREILLE EXTERNE

Allure

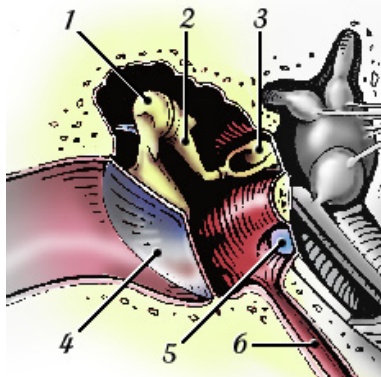


L'oreille externe amplifie les sons KhZ et permet la localisation des sons.

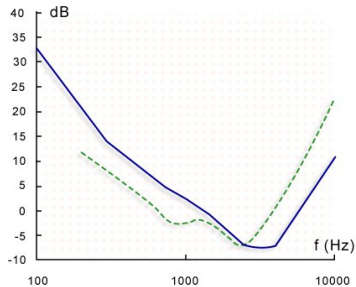
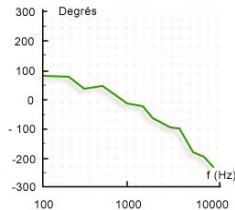
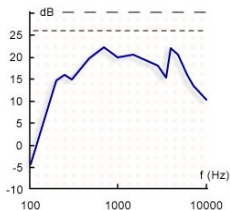


L'OREILLE MOYENNE

Allure

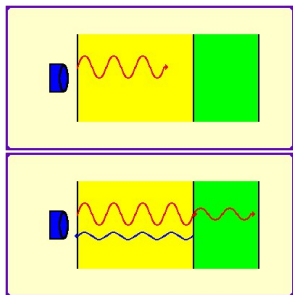


L'oreille moyenne assure l'adaptation d'impédance entre l'air et « l'eau ».



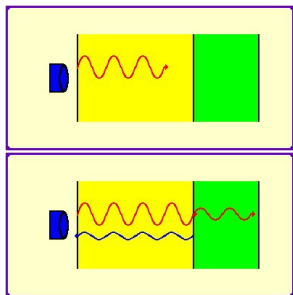
L'ADAPTATION D'IMPÉDANCE

Réflexion et transmission



L'ADAPTATION D'IMPÉDANCE

Réflexion et transmission

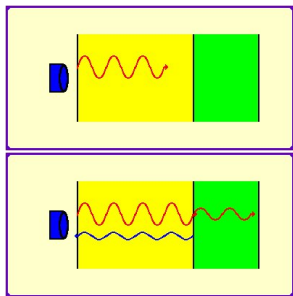


RÉSULTATS

- $T = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$.
- $Z(\text{air}) = 4,5 \times 10^2 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$,
 $Z(\text{eau}) = 1,48 \times 10^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$,
 $Z(\text{os}) = 7,6 \times 10^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.
- $T(\text{air/eau}) = 0.001 \rightarrow -30 \text{ dB!}$
 $T(\text{eau/os}) = 0.55 \rightarrow -2.6 \text{ dB!}$

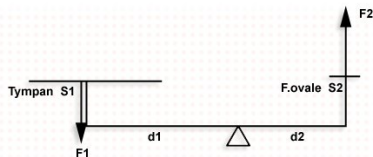
L'ADAPTATION D'IMPÉDANCE

Réflexion et transmission



RÉSULTATS

- $T = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$.
- $Z(\text{air}) = 4,5 \times 10^2 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$,
 $Z(\text{eau}) = 1,48 \times 10^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$,
 $Z(\text{os}) = 7,6 \times 10^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.
- $T(\text{air/eau}) = 0.001 \rightarrow -30 \text{ dB}$!
 $T(\text{eau/os}) = 0.55 \rightarrow -2.6 \text{ dB}$!

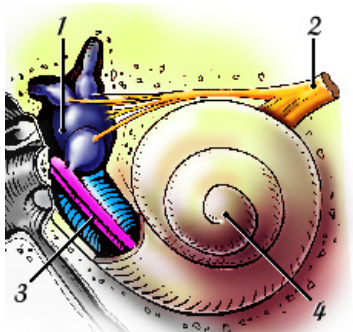


Effet de levier sur les pressions :

$$\frac{S_1 d_1}{S_2 d_2} = \frac{0.6}{0.03} \times 1.3 = 26 \rightarrow 28 \text{ dB}!$$

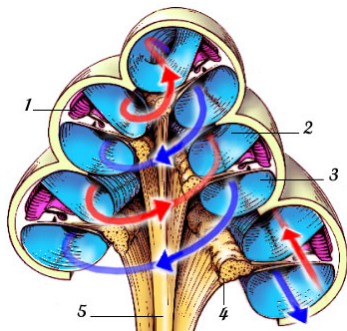
L'OREILLE INTERNE

Allure



1. vestibule.
3. organe de Corti.
4. cochlée.

Section axiale

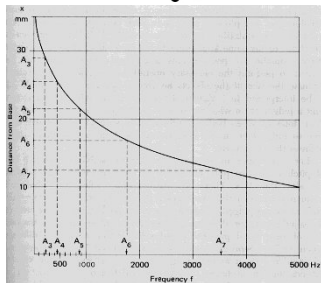
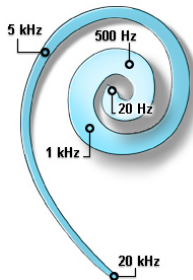
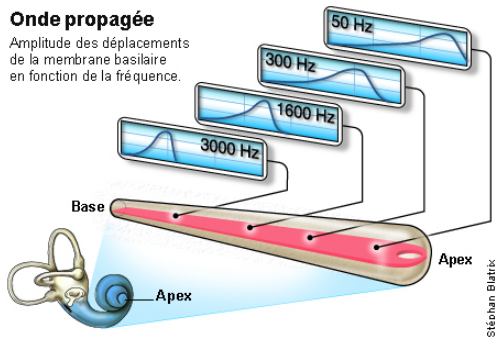


1. canal cochléaire (→ organe de Corti)
2. rampe vestibulaire (→ fenêtre ovale)
3. rampe tympanique (→ fenêtre ronde)

L'onde propagée

Onde propagée

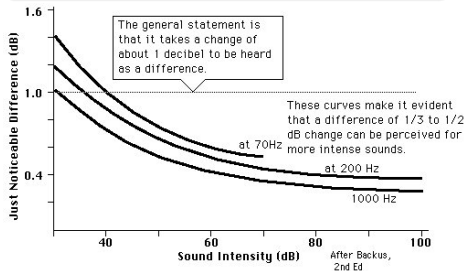
Amplitude des déplacements de la membrane basilaire en fonction de la fréquence.



« JND » : JUST NOTICEABLE DIFFERENCE

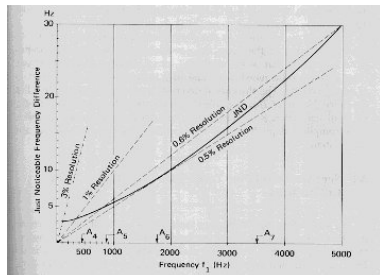
Quelques illustrations sonores ...

JND des intensités



Sensibilité moyenne ~ 1 dB

JND des fréquences



Sensibilité moyenne
 \sim minimum (3 Hz, 0.6 %)

L'EFFET DE MASQUE

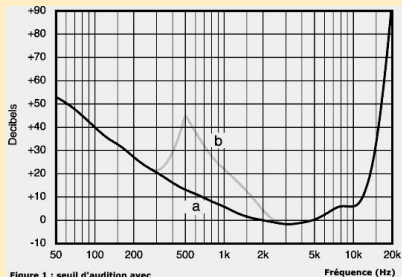


Figure 1 : seuil d'audition avec
a) aucun signal en entrée
b) un signal fort de 70 dB SPL à 500 Hz

Un bruit centré sur f masque les sons de fréquences voisines de f (→ codage MP₃).

L'EFFET DE MASQUE

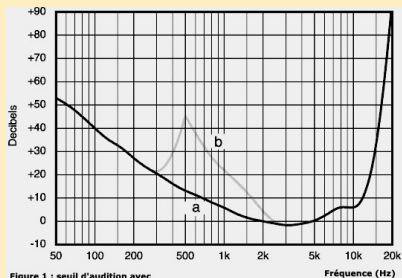
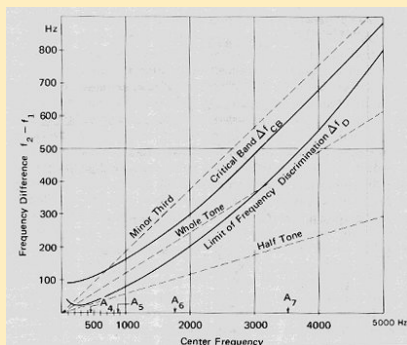


Figure 1 : seuil d'audition avec
a) aucun signal en entrée
b) un signal fort de 70 dB SPL à 500 Hz

Un bruit centré sur f masque les sons de fréquences voisines de f (\rightarrow codage MP₃).

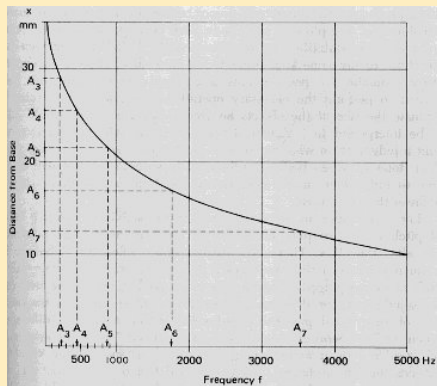
LA BANDE CRITIQUE



Autour de chaque « tonalité », il existe une bande de fréquence où la perception est modifiée.

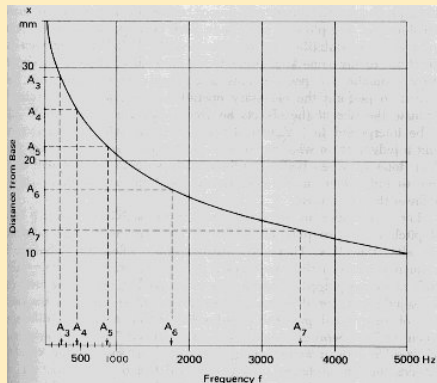
LE MASQUAGE II

L'EXITATION DE LA MEMBRANE BASILAIRE



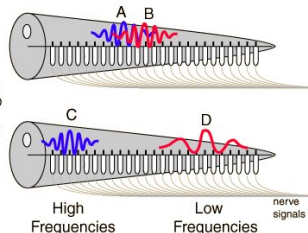
LE MASQUAGE II

L'EXITATION DE LA MEMBRANE BASILAIRE



LA CONFUSION DES FRÉQUENCES

If sounds A, B, C, D are adjusted to have identical loudnesses when sounded alone, then the combination C+D would be expected to sound louder than A+B because C and D are not competing for the same nerve endings in the inner ear.



Confusion des fréquences → sons dissonants ou consonnants.