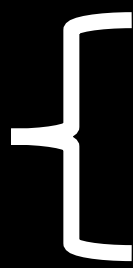
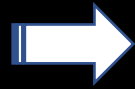


### 3. Biophysique de l'audition



3.1. L'audition en bref

3.2. Signal physique

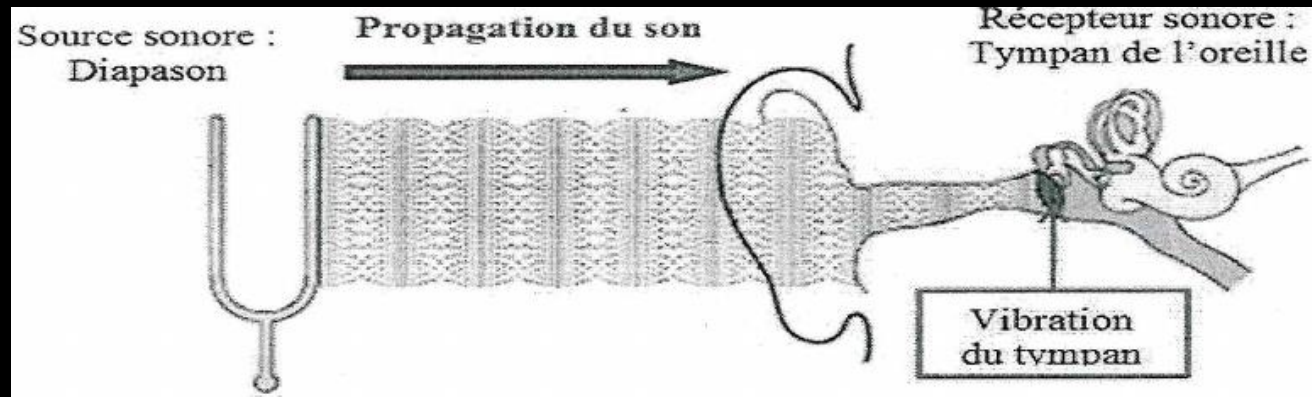
3.3. Chaîne auditive

3.4. Message sensoriel

3.5. Explorations fonctionnelles de l'audition

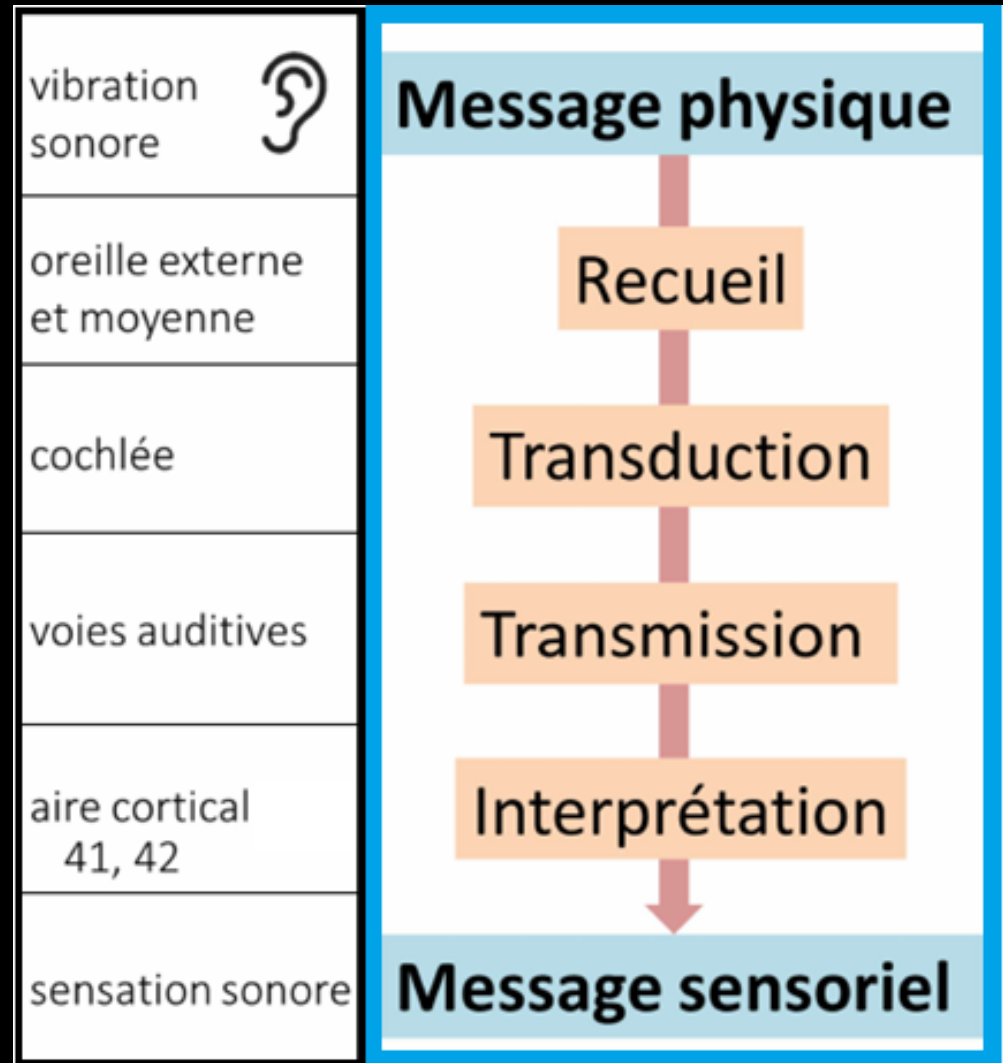
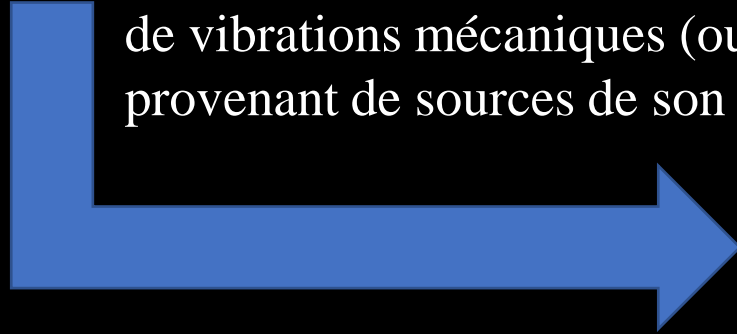
#### 3.1. L'audition en bref

- ✓ L'audition est la perception de l'énergie qui est transportée par les ondes sonores.
- ✓ Le son est capté par le pavillon (partie visible de l'**oreille externe**) pour être ensuite envoyé sous forme de vibrations dans le conduit auditif jusqu'au tympan (membrane qui agit comme une peau de tambour). Ces vibrations sont transmises à l'**oreille moyenne** où elles sont amplifiées par la **chaîne des osselets** ( le marteau, l'enclume et l'étrier) pour ensuite être transférées à l'**oreille interne**, où les cellules cillées (dans l'organe de corti) de la cochlée les transforment en **signaux neurosensoriels** (ou électriques) qui sont transmis au cerveau pour être interprétés.



## 3.2. Signal physique

- ❑ Le signal physique de l'audition est constitué de vibrations mécaniques (ou ondes sonores) provenant de sources de son précises.



## ❑ Le son ?

✓ Un son ne peut exister qu'à travers 3 phases :

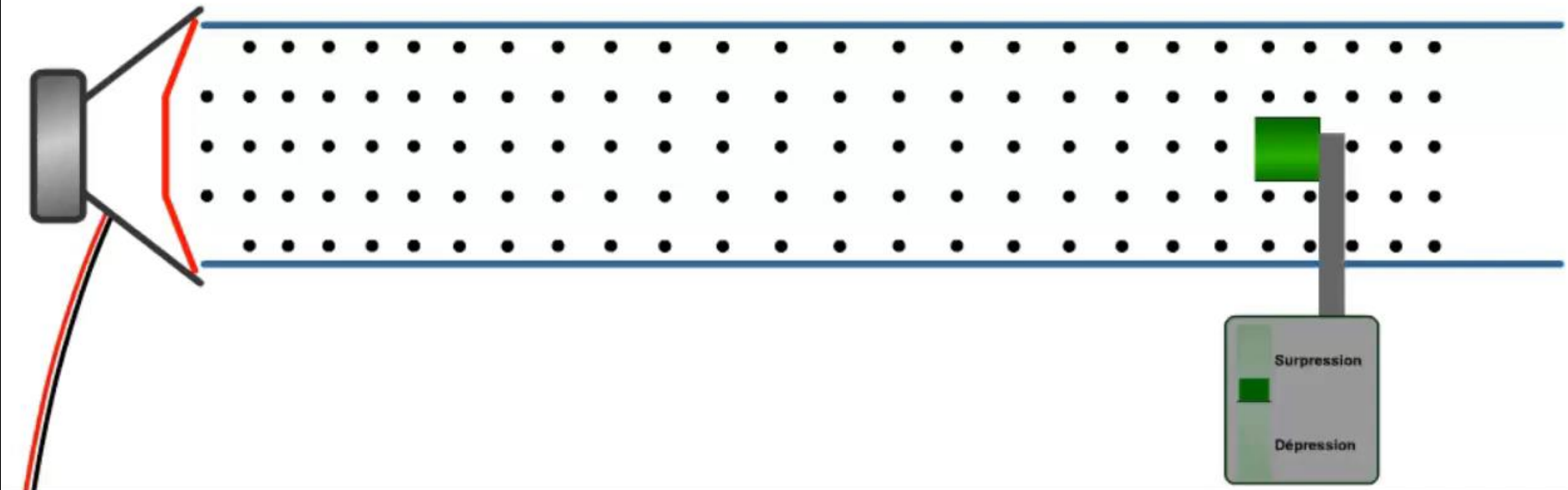
a) **Émission**: résulte des vibrations des particules dans un matériel (air, liquide et solide)

Exemple: imaginez un haut parleur qui fait vibrer les molécules d'air

b) **Propagation**: se fait de proche en proche dans le milieu matériel (qui est l'air dans ce cas) dans une direction dite de propagation.

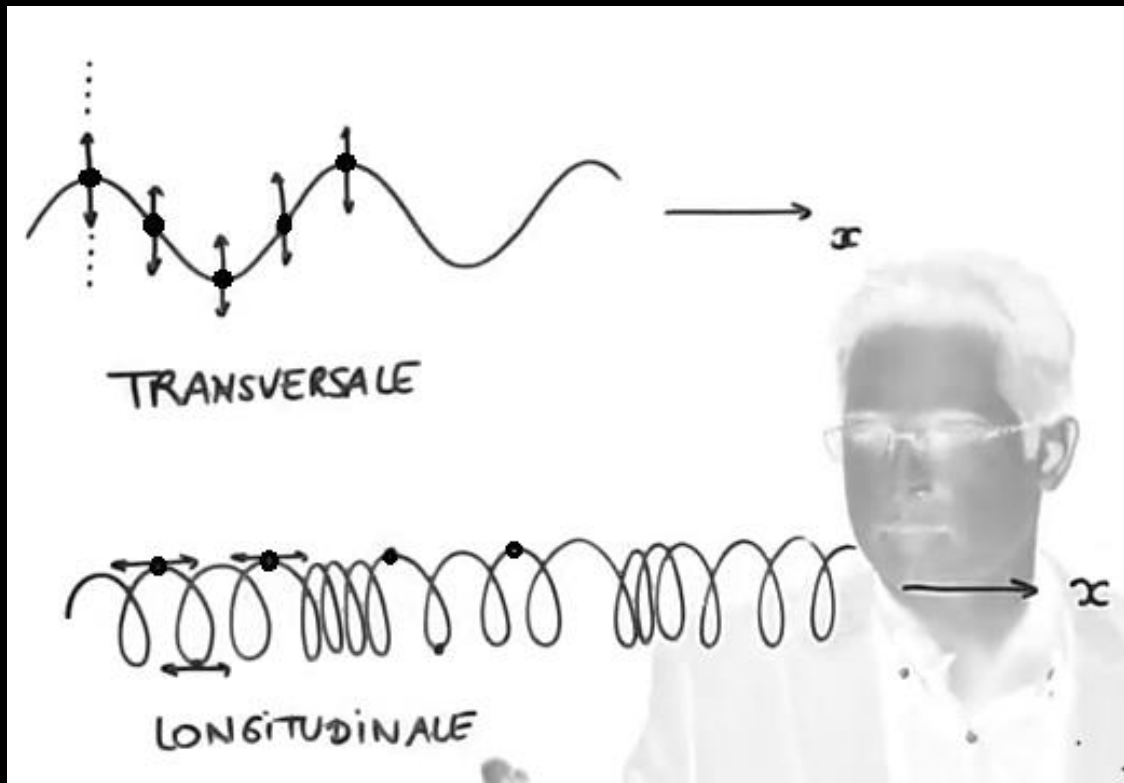
c) **Réception**: se fait par un récepteur qui est une membrane (tympan)

## Propagation d'une onde sonore plane

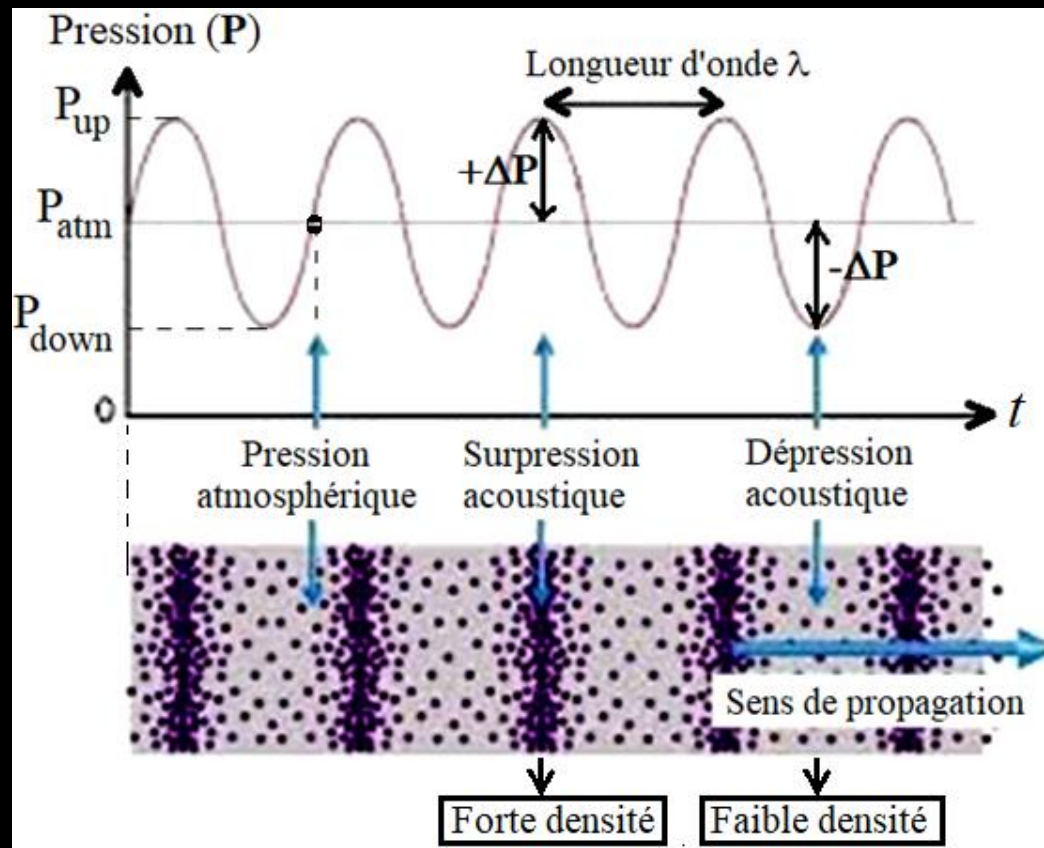


## □ Propagation du son

- Les sons ne se propagent pas dans le vide. (c-à-d, il faut un support matériel)
- Dans un fluide (gaz ou liquide), les ondes sonores sont toujours longitudinales.
- Dans un milieu solide : deux composantes = 1.ondes longitudinale + 2.transversales
  - **Onde transversale (OT)** : la déformation (ex. pression ou déplacement) ou la vibration est perpendiculaire à la direction de propagation.
  - **Onde longitudinale (OL)** : la déformation (ex. pression ou déplacement) ou la vibration est parallèle à la direction de propagation.



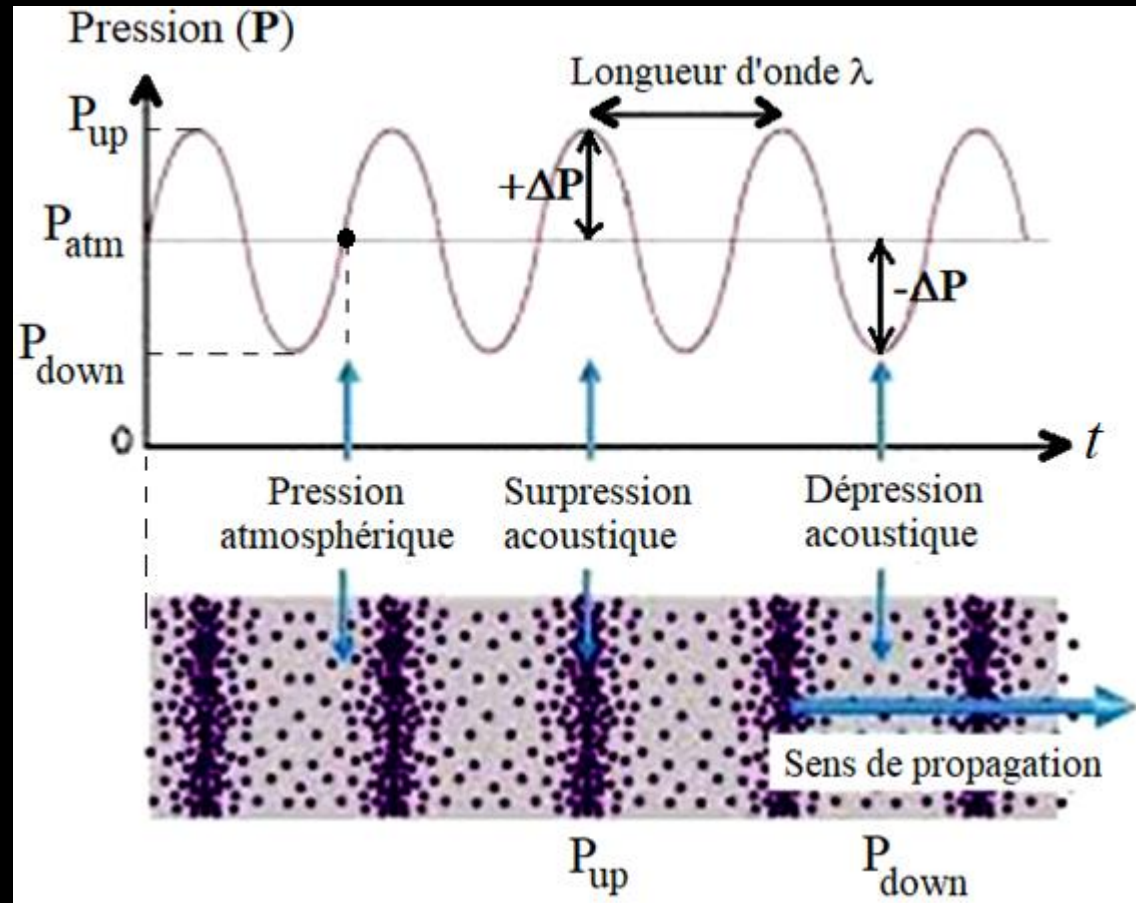
- La propagation du son dans l'air ( $\rho_{\text{air}} = 1,3 \text{ kg/m}^3$ ) s'explique par la variation périodique de la pression des molécules d'air.
- **C-à-d.** Le long de l'axe de propagation, les particules subissent un déplacement vibratoire sinusoïdal «  $x(t) = A.\sin(\omega.t)$  où  $\omega = 2\pi f$  » autour de leurs positions de repos, leur densité sur cet axe varie, faisant apparaître des régions plus denses et d'autres moins denses qu'à l'état de repos. Des variations de pression autour de la pression atmosphérique, donc des surpressions (phase de compression) et des dépansions (phase de dilatation) par rapport à la pression de base ( $P_{\text{atm}}$ ). Cette variation est appelée la **pression acoustique (P en Pa)**



- La pression acoustique est dans la gamme :  **$2.10^{-5}$  à  $20 \text{ Pa}$** . Elle est faible devant la pression atmosphérique ( $P_{\text{atm}} = 1 \text{ atm} = 1,013.10^5 \text{ Pa}$ ).

$$P = \rho v c$$

$\rho$ :masse volumique  
 $v$ : vitesse acoustique  
 $c$ :célérité acoustique

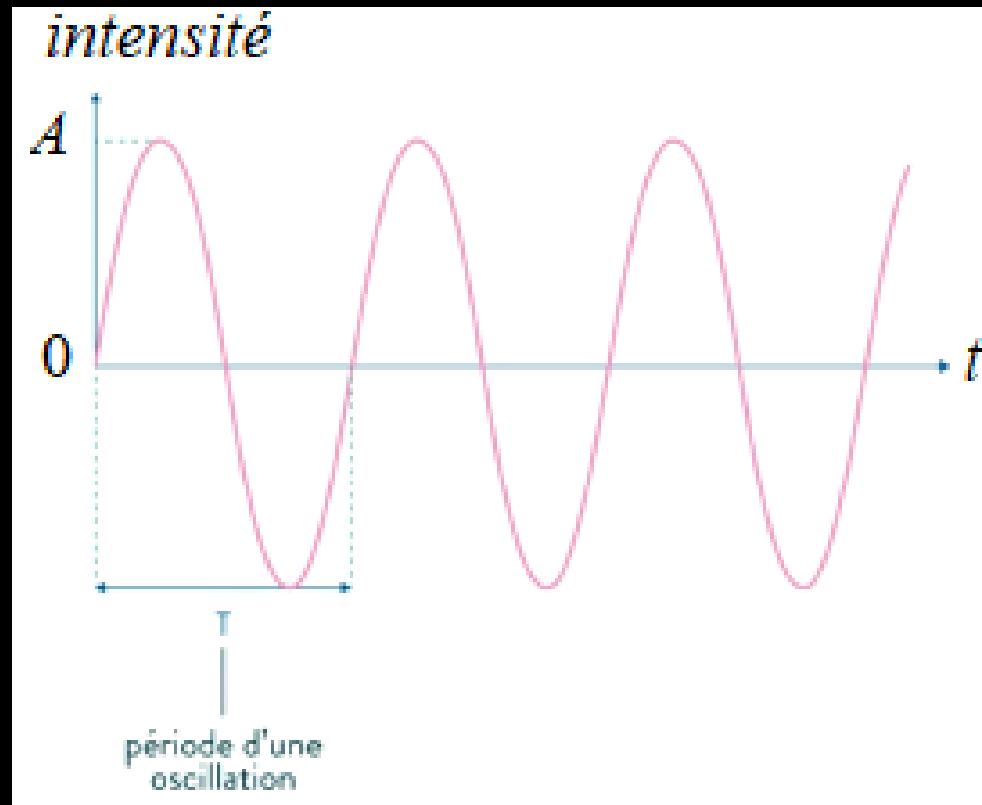


- Il faut distinguer entre :
- ✓ **Vitesse vibratoire ou vitesse instantanée ( $v$ )** : vitesse locale d'une particule (une masse) mise en mouvement de vibration :  **$v = dx/dt = A.\omega.\cos(\omega t)$**
  - ✓ **Célérité du son ( $c$ )** : célérité de la propagation de l'onde sonore (une énergie) le long de la direction de propagation



## ❑ Caractéristiques d'une onde sonore

- ❖ **La longueur d'onde  $\lambda$  (m)** : c'est la distance parcourue par l'onde pendant une période  $T$ .
- ❖ **La période  $T$  (s)**
- ❖ **La fréquence  $f$  (Hz ou  $s^{-1}$ )** : c'est le nombre d'oscillations / une seconde  $\Rightarrow f = 1/T$
- ❖ **L'intensité (ou Amplitude)** du son et s'exprime en **dB**



## □ Célérité du son

Si le milieu est isotrope, la célérité ne dépend que des caractéristiques du milieu. Les sons vont d'autant plus vite que les milieux sont solides.

- Dans l'air :  **$c = 330$  à  $340$  m/s**
- Dans l'eau :  **$c = 1450$  m/s**
- Dans le tissu mou :  **$c = 1540$  m/s**
- Dans l'os :  **$c = 3300$  m/s**

$$C = 20 \sqrt{Temp}$$

température en kelvin

Célérité  $c \approx 340$  m/s (à 20°)

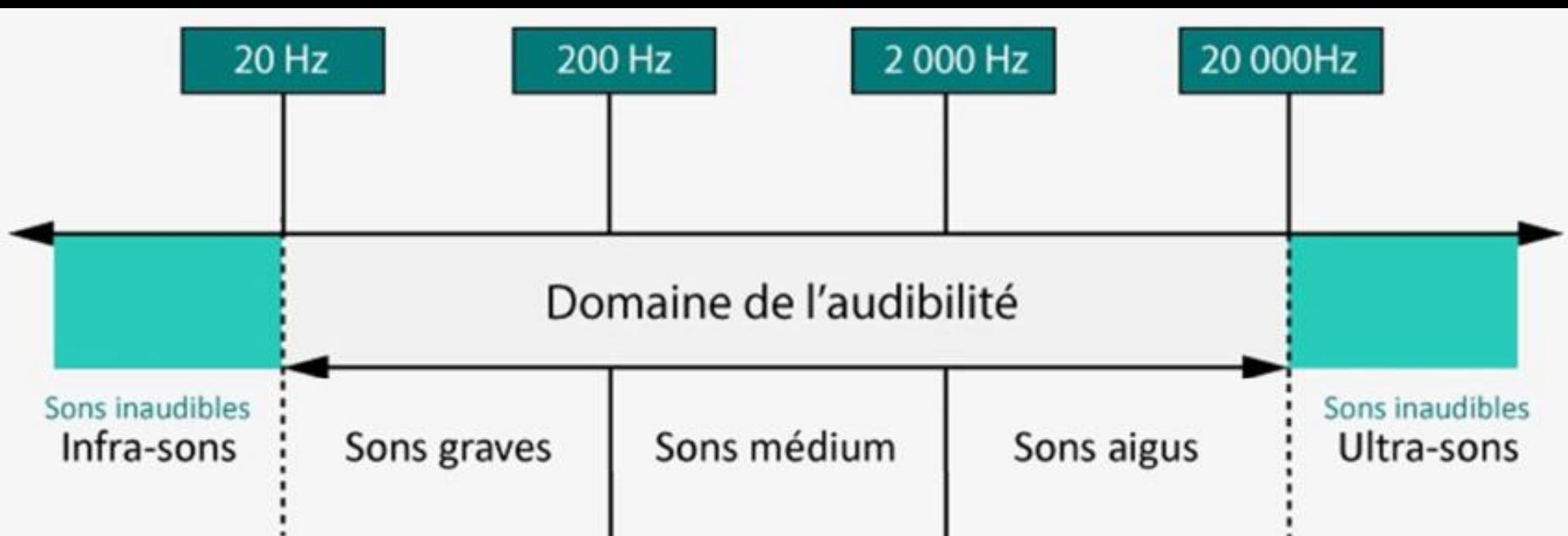
$$C = \frac{\lambda}{T} = \lambda . f$$

m/s    s        m    Hz



## □ Domaine de l'audibilité

- ✓ Les infra-sons  $< 20$  Hz (éléphant)
- ✓ Les sons audibles : 20 Hz – 20000 Hz (être humain)
- ✓ Les ultra-sons  $> 20000$  Hz (chauve-souris)



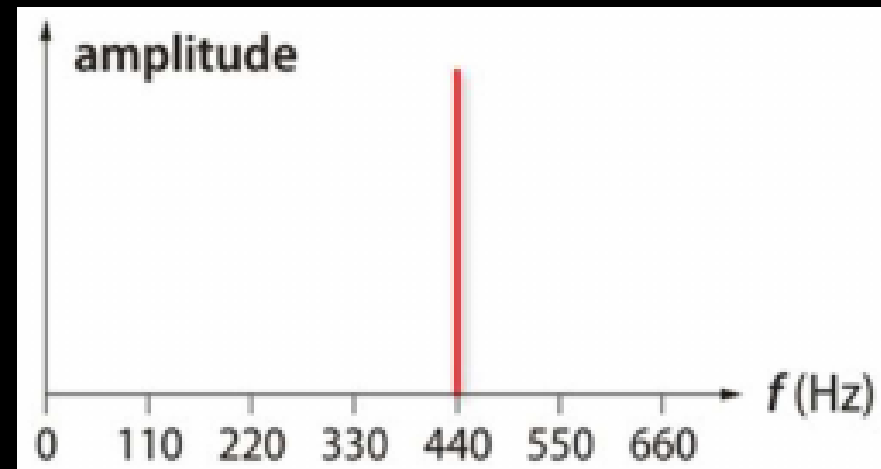
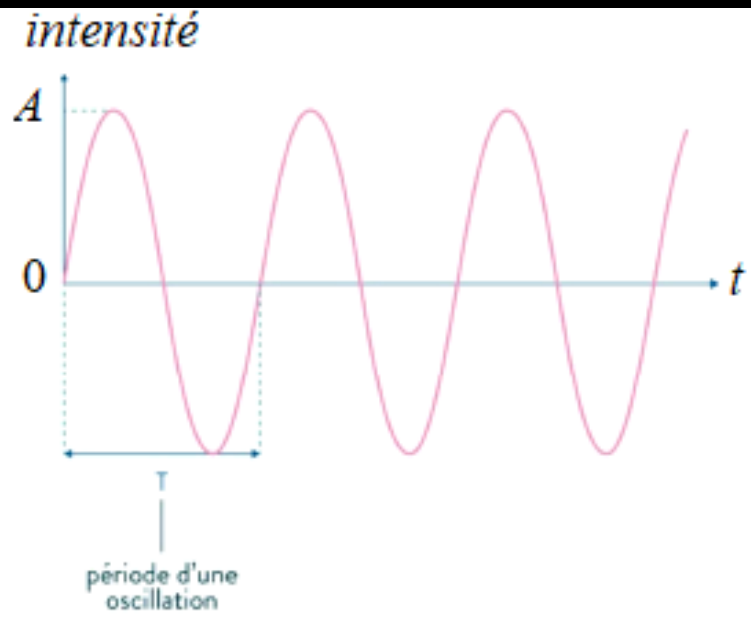
## Remarques

- ❖ En conversation normale  $\Rightarrow f$  : varie de 85 à 7000 Hz
- ❖ Les ondes sonores, infra- et ultra-sonores ne sont pas ionisantes.

## □ Types du son

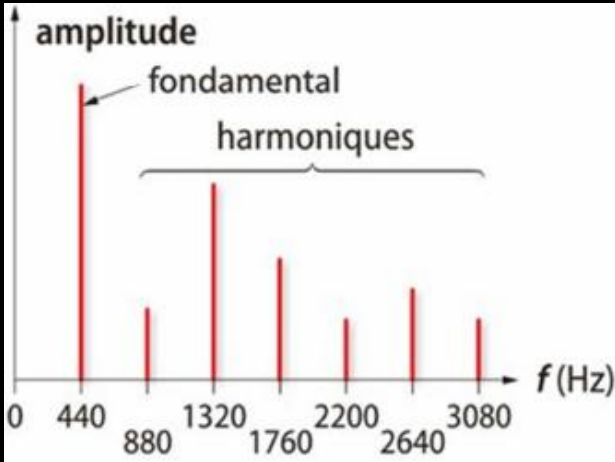
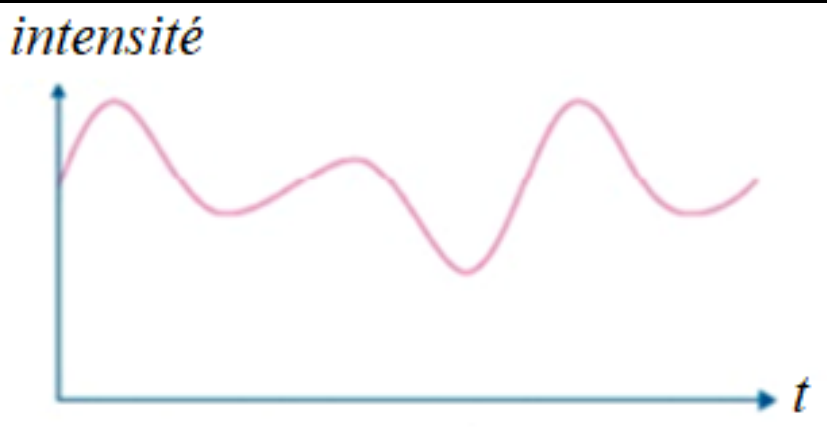
➤ **Un son pur** est un son comportant un seul harmonique. Il est sinusoïdal. Sa fréquence est égale à la fréquence de cet harmonique.

**Un son pur** => Amplitude (**A**) ; période (**T**) et fréquence (**f**) sont constants



➤ **Un son complexe** est un son comportant un fondamental et des harmoniques il n'est pas sinusoïdal. Sa fréquence est égale à la fréquence du fondamental

**Un son complexe** => Amplitude (**A**) ; période (**T**) et fréquence (**f**) sont variables



➤ **Un bruit** : Le bruit est un son avec plein de fréquences parasites mais pas de fréquence fondamentale qui le caractérise.

A graph showing a periodic sound wave. The vertical axis is labeled 'intensité' and the horizontal axis is labeled 't'. The wave is periodic and non-sinusoidal, with a blue curve showing multiple peaks and troughs within one cycle. A bracket above the wave is labeled 'période'.

**Son périodique  
(musique)**  
Fréquence fondamentale +  
Harmoniques

A graph showing a noise wave. The vertical axis is labeled 'intensité' and the horizontal axis is labeled 't'. The wave is non-periodic and non-sinusoidal, with a blue curve showing multiple peaks and troughs within one cycle.

**Bruit**  
Pas de fréquence  
caractéristique  
Aucune périodicité

## ❑ Puissance acoustique (W)

- ✓ L'onde sonore transporte une énergie (sans transport de matière) et cette énergie est une **puissance acoustique par unité de surface** (ou **Intensité sonore**), notée **I** et exprimée en **Watt/m<sup>2</sup>**.

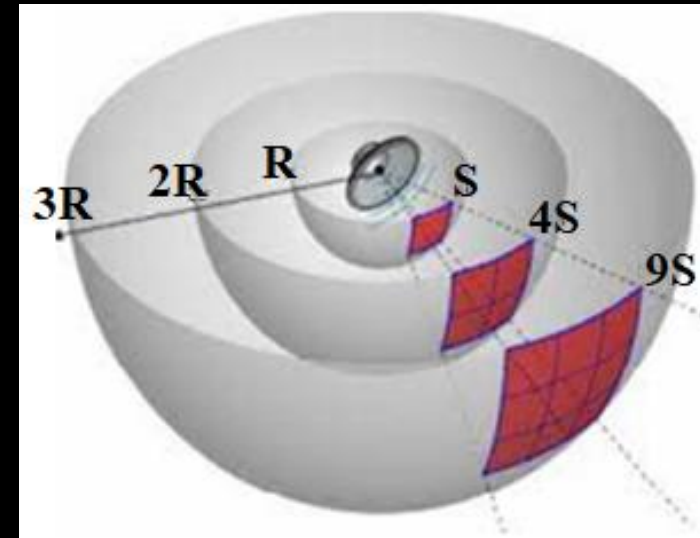
$$I = \frac{\overset{\text{Puissance}}{d(\text{travail})/dt}}{S} = \frac{F \cdot dx}{S \cdot dt} = \frac{P \cdot S \cdot dx}{S \cdot dt} = P \cdot v = v^2 \cdot \rho \cdot c$$

$$\text{Comme } v = P/\rho c \rightarrow I = P^2/\rho c$$

## ✓ Remarques

- ❖ Plus on s'éloigne de la source sonore, la surface augmente et l'intensité acoustique (I) diminue.

$$I = \frac{\text{Puissance}}{S} = \frac{\text{Puissance}}{4\pi R^2} \quad (\text{Watt/m}^2)$$



- ❖ **Le seuil d'audibilité** est la puissance minimale qui fait vibrer le tympan. La puissance (ou l'intensité) de référence est :  **$I_0 = 10^{-12} \text{ Watt/m}^2$**

## ❑ Impédance acoustique (Z)

c'est la propriété fondamentale du milieu de propagation. C'est la résistance du milieu matériel à la propagation de l'onde sonore.

$$Z = P/v = \rho c$$

Avec :

Z: impédance acoustique

P: pression acoustique

v: vitesse vibratoire

c: célérité;  $\rho$ : masse volumique

### Quelques valeurs d'impédance acoustique

Air  $z = 0,04 \times 10^3 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$

eau  $z = 1,48 \times 10^3 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$

foie  $z = 1,65 \times 10^3 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$

os  $z = 7,5 \times 10^3 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$

## ❑ Le niveau d'intensité sonore (S)

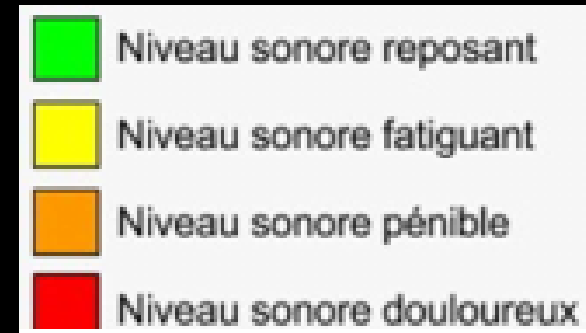
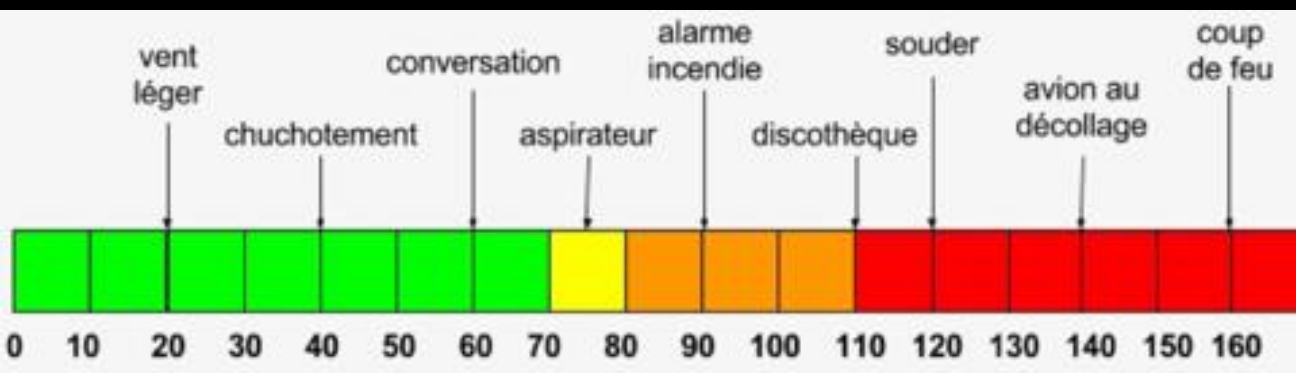
Comme l'intensité acoustique ( $I$ ) varie dans un rapport de  $10^{12}$ , le grand domaine justifie l'utilisation d'une échelle logarithmique. Le niveau d'intensité sonore  $S$  en décibel (**dB**), est donné par :  **$S = 10 \text{ Log } (I/I_0)$**

$I_0$  est le minimum audible d'un son pure à 1000 Hz  $\Rightarrow$   **$I_0 = 10^{-2} \text{ Watt/m}^2$**

- ✓ Si:  $I = 10.I_0 \Rightarrow S = 1\text{dB} \Rightarrow 1\text{dB}$  correspond à une augmentation de  $I_0$  de 10 fois.
- ✓ L'étendue des sons audibles  $\sim$  de 0 à 120 dB. (En conversation normale  **$S \sim 60 \text{ dB}$** )
- ✓ Plus de 120 dB, on aura une sensation douloureuse
- ✓ Très important :  **$S$  est non additif**. Par contre,  **$I$  est additive**

C-à-d.: on additionne jamais deux intensités en dB

Exemple: deux sons de 70 dB  $\Rightarrow 70 \text{ dB} + 70 \text{ dB} \neq 140 \text{ dB}$



❑ **Relations entre : I (watt/m²), P (Pa) et S (dB) ?**

✓ **Tableau** : valeurs de I (watt/m²), P (Pa) et S (dB) dans l'air ( $\rho_{\text{air}} = 1,3 \text{ kg/m}^3$ ,  $c = 340 \text{ m/s}$ ).

✓  **$S = 10 \text{ Log } (I/I_0)$**   $\Rightarrow$   **$I = I_0 \cdot 10^{(S/10)}$**

✓ On a :  **$I = P^2/\rho c$**   $\Rightarrow$   **$S = 20 \text{ Log } (P/P_0)$**

✓  $\text{Log } (x) = \text{Ln}(x) / \text{Ln}(10)$

✓  $y = \text{Log}(x) \Rightarrow x = 10^y$

I (watt/m²)	P (Pa)	S (dB)
$10^{-12} = I_0$	$2 \cdot 10^{-5} = P_0$	0
$10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-4}$	20
$10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-3}$	40
$10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-2}$	60
$10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-1}$	80
$10^{-2}$	2	100
1	20	120
$10^2$	200	140

➤ **Questions :**

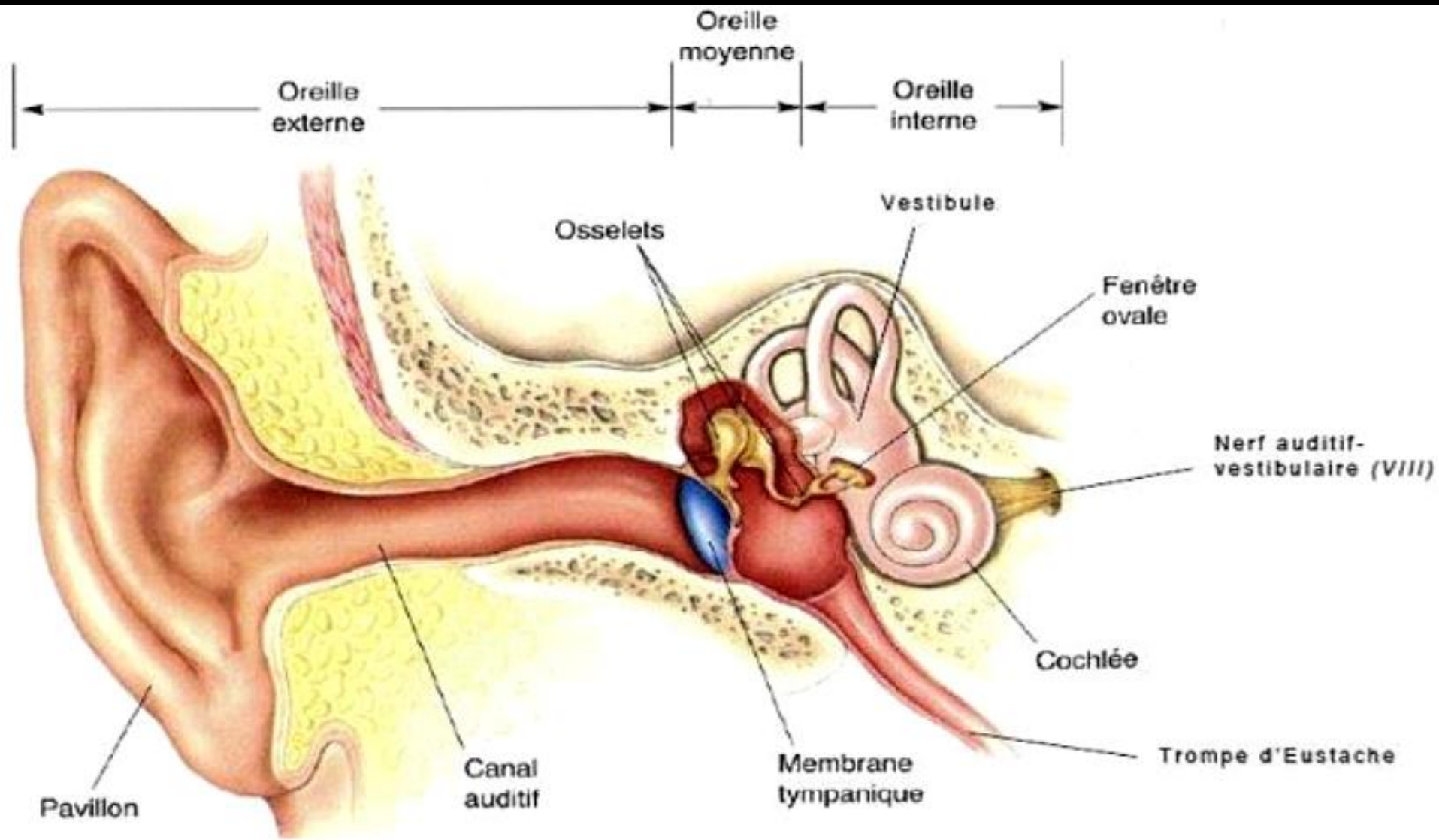
1) Si une source sonore émet un son de 120 dB, quel sera le niveau sonore de deux sources identiques ?  $\Rightarrow$  **Réponse : S =**

2) Combien faut-il de personnes parlant chacune avec une voix de 20 dB pour égaler la voix d'un conférencier de 50 dB ?  $\Rightarrow$  **Réponse : n =**



### 3.3. Chaîne auditive : phénomène objectif de l'audition

✓ L'oreille est l'organe de l'audition. Voici une représentation simplifiée :



L'oreille est composé de : « **Anatomie et physiologie de l'oreille** »

**(i) L'oreille externe** : elle comprend le pavillon qui capte et concentre les ondes sonores, le canal auditif externe, par lequel transitent les ondes sonores, ainsi que le tympan qui vibre sous l'effet de ces ondes

**(ii) L'oreille moyenne** : Celle-ci peut être assimilée à une cavité comprise entre le tympan (**chambre contenant de l'air**) et la fenêtre ovale. Elle comprend un jeu d'osselets (marteau, enclume, et étrier) ayant pour but d'amplifier le son. Il s'agit d'un organe de transmission des vibrations sonores du tympan à l'oreille interne.

**(iii) L'oreille interne comprend deux ensembles :**

a- un organe d'équilibration composé du vestibule et des canaux semi-circulaires

b- un organe d'audition, la cochlée , constituée de trois canaux.

Plus simplement, l'oreille interne peut se résumer en deux « labyrinthes » : le labyrinthe osseux, **plein d'un liquide**, le périlymphe (liquide incompressible qui transmet les variations de pression) et le labyrinthe membraneux (qui contient l'endolymphe)

# REMARQUES

## ❖ Les muscles au niveau de l'oreille moyenne

Les mouvements des osselets sont assurés par des muscles dont deux :

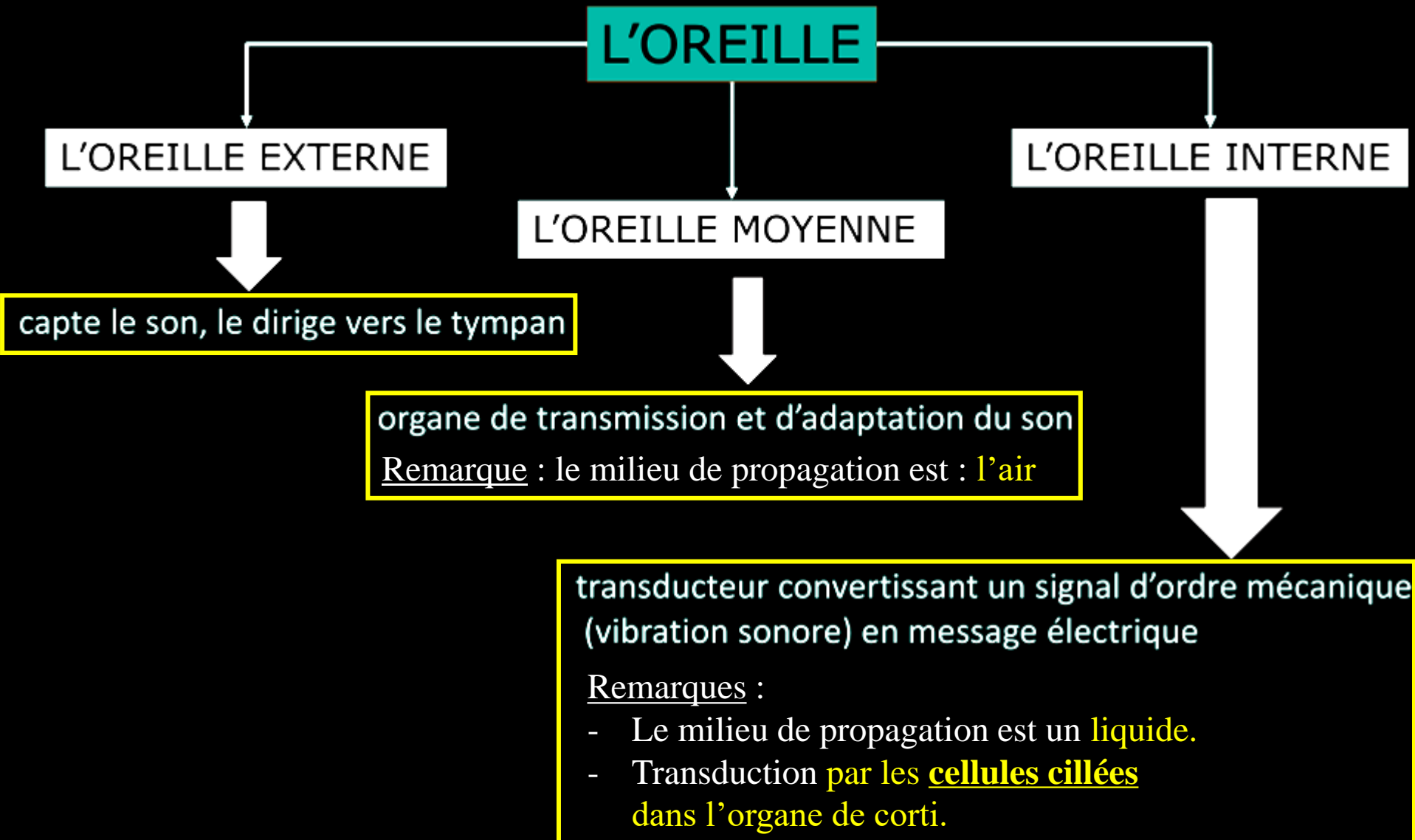
- ✓ Le muscle du marteau : le muscle qui écoute, il adapte la tension du tympan à l'onde sonore et permet une détection du son dans les meilleures conditions
- ✓ Le muscle de l'étrier : le muscle qui protège, il tend la membrane de la fenêtre ovale et limite l'amplitude de ses vibrations, et assure la protection de l'oreille interne contre les sons de sonie trop élevée

## ❖ La trompe d'Eustache

Elle relie la cavité de l'oreille moyenne au pharynx. Elle permet l'égalisation des pressions de chaque côté du tympan afin d'assurer une vibration correcte de celui-ci.

Si la pression atmosphérique varie rapidement, la pression interne n'a pas le temps de s'équilibrer et on voit apparaître une sensation de surdité qui peut être corrigée par bâillement ou déglutition.

## En biophysique fonctionnelle de l'oreille :



### 3.4. Message sensoriel : phénomène subjectif de l'audition

- ✓ Pour les sons purs, 3 qualités physiologiques sont perçus:
- ❖ **Tonie (hauteur)** : qui permet de dire qu'un son est +/- **aiguë**
  - ❖ **Sonie (intensité)** : qui permet de dire qu'un son est +/- **fort**
  - ❖ **Timbre (qualité)** : qui permet de **distinguer** deux sons de **même hauteur** et **même intensité** (violon ou piano)
- Ces trois caractéristiques constitue le message sensoriel.

**Tonie  
(hauteur)**

Grave  
ou  
aiguë

**Sonie  
(intensité)**

Forte  
ou  
faible

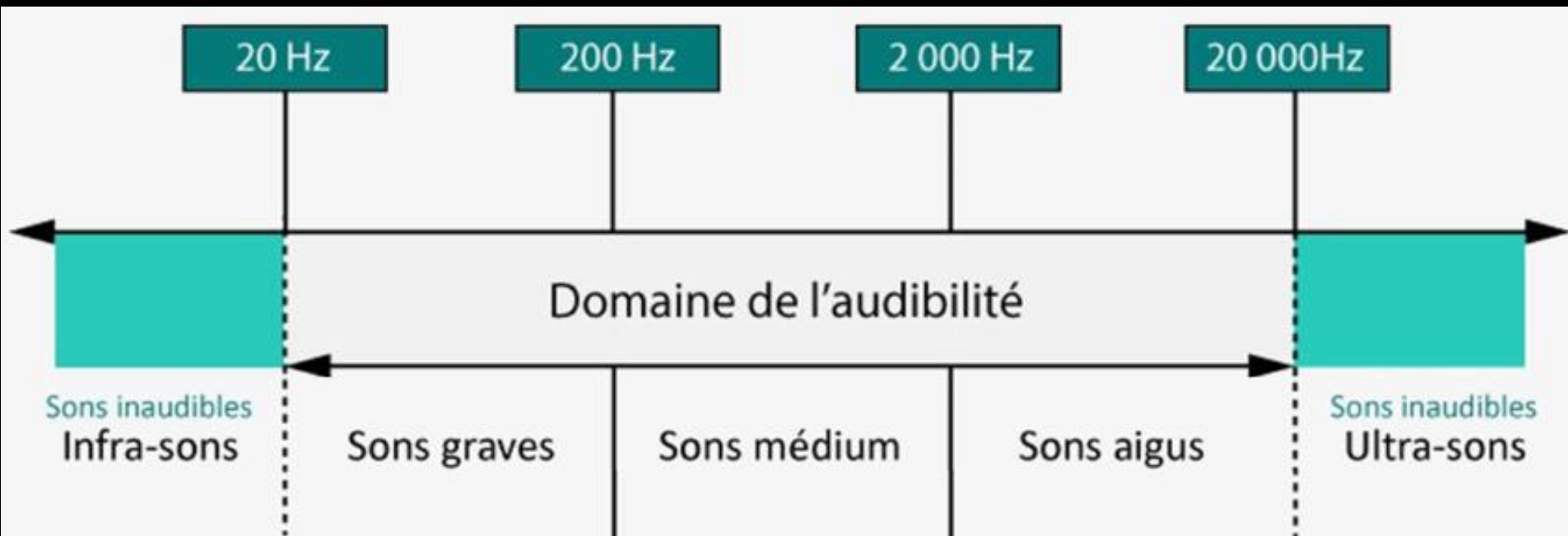
**Timbre  
(qualité)**

Violon  
ou  
piano

### 3.4.1. La Tonie (hauteur)

Cette sensation est liée à la fréquence du son ce qui fait dire qu'un son est +/- aigüe

- Plus les fréquences sont hautes, le son paraît aigüe
- Plus les fréquences sont basses, le son paraît grave



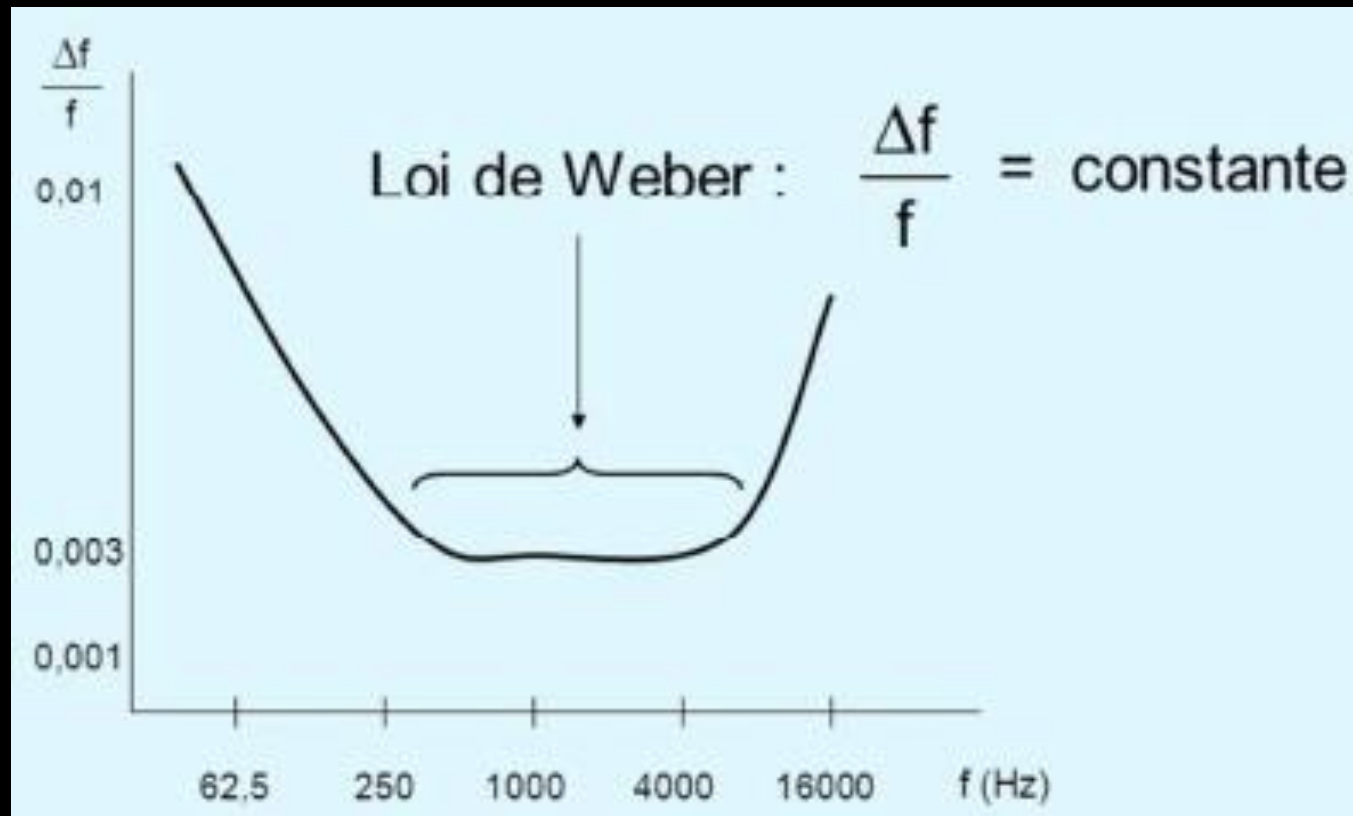
✓ Pour déterminer une échelle des hauteurs (H), il faut étudier le seuil différentiel relatif de tonie :  $\Delta f / f$

Soit  $f$  (fréquence) capable de produire H (Hauteur).

$\Delta f$  : seuil différentiel de fréquences, c'est les différences minimales nécessaires entre deux fréquences pour avoir une sensation H différente.

On remarque que  $\Delta f / f = \text{constante}$  entre 500 – 8000 Hz, et égale : 0,2 -- 0,3%

→ C'est la loi de Weber





### 3.4.2. La Sonie (intensité)

- ✓ **La sonie**: est la qualité physiologique qui fait dire qu'un son est +/- fort. Elle dépend :
  - principalement de l'intensité acoustique du son en dB (Rq. **Intensité  $\Leftrightarrow$  Amplitude**)
  - secondairement de la fréquence du son
- ✓ **Le Phone** (unité physiologique) : c'est le niveau de la sensation de la sonie. Il est étalonné sur l'échelle des dB à fréquence 1000 Hz, c'est-à-dire : **n dB = n phone** à 1000 Hz et à partir de là on définit le seuil absolue pour chaque fréquence, et ceci permet de tracer la courbe isotonique.

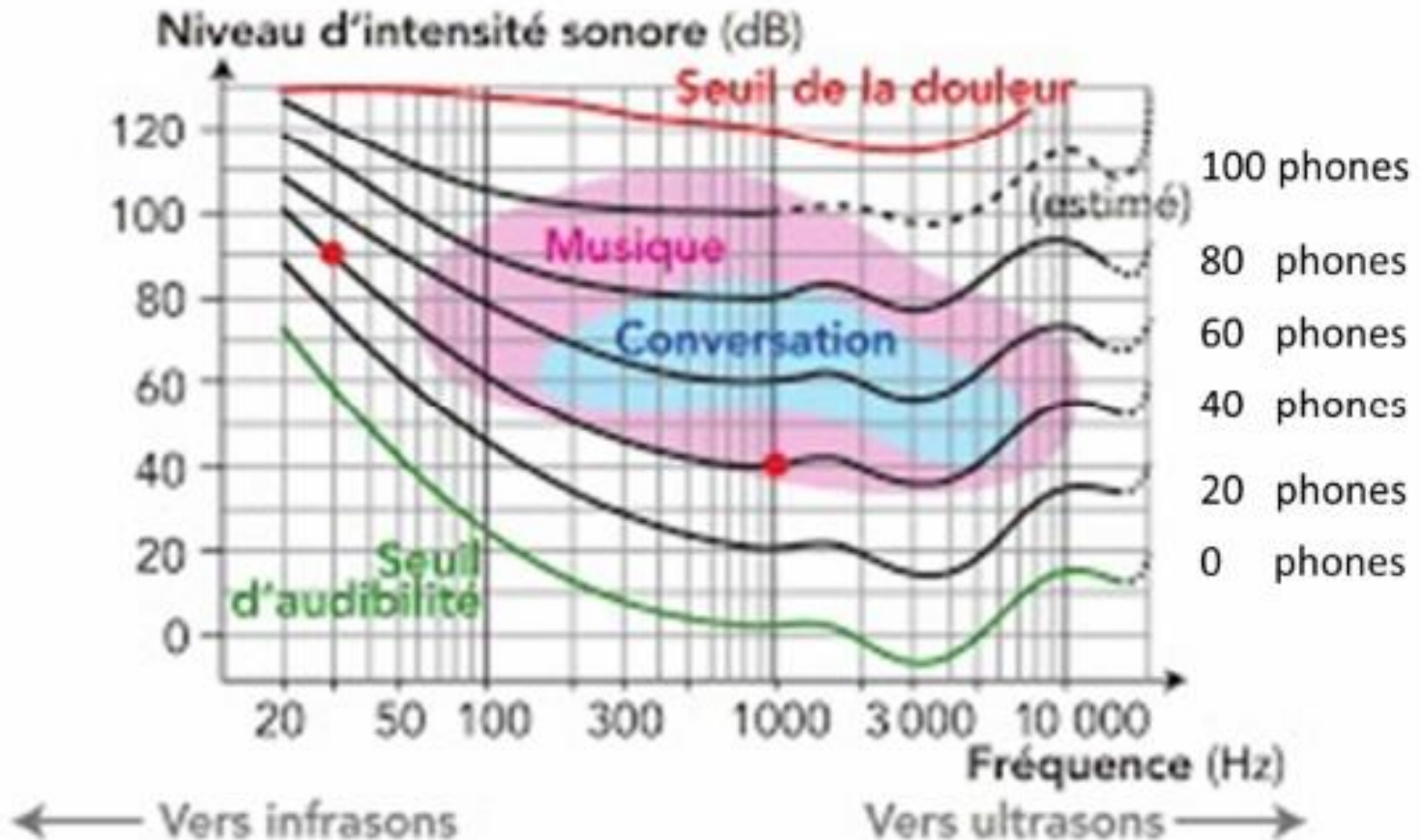
Seuil absolue de perception	
Fréquence (Hz)	Seuil absolue (dB)
125	20
250	10
500	5
1000	0
2000	-3
4000	-5
8000	15

✓ **La courbe Isosonique** : est l'ensemble de points qui donnent la même sensation d'intensité sonore.

**0 phone** : c'est le seuil liminaire (minimum audible)

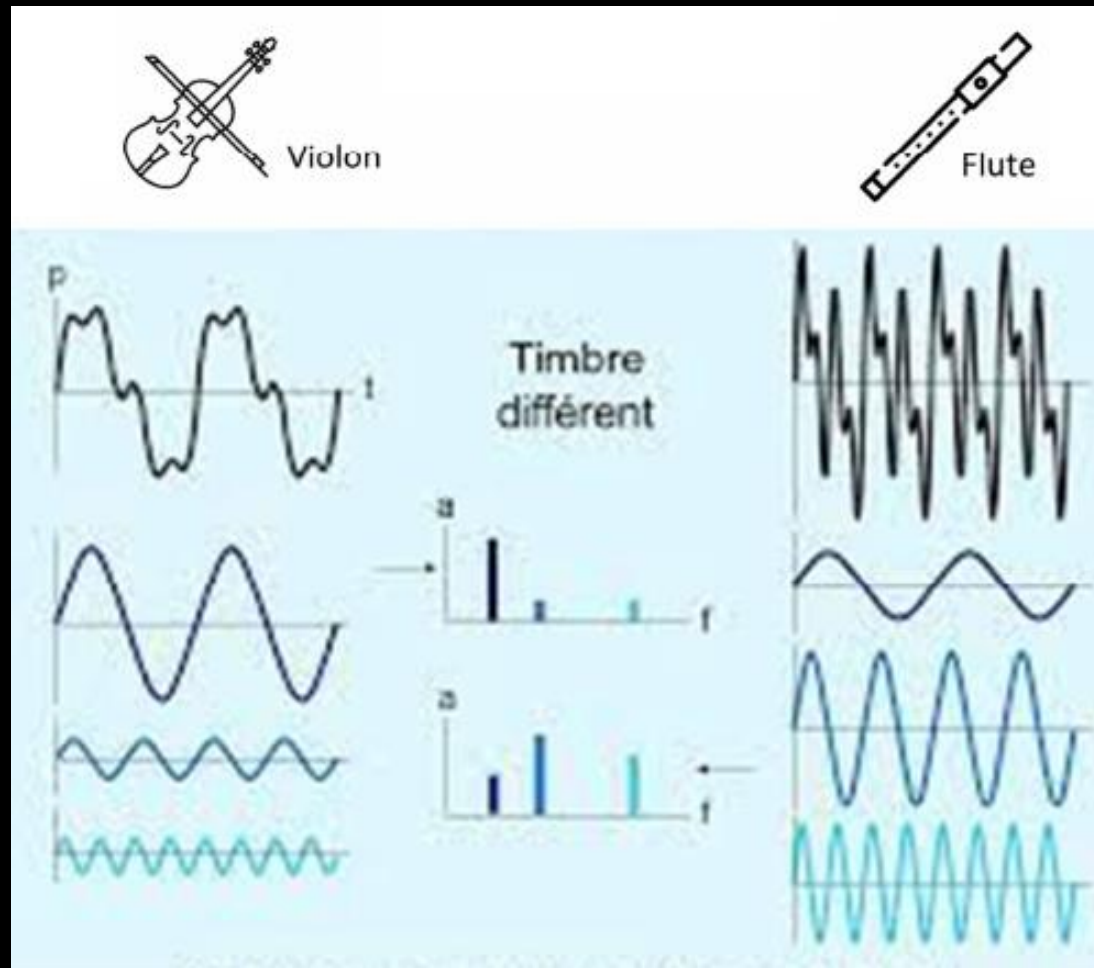
**120 phones** : c'est le seuil douloureux

Courbe isosonique de Fletcher et Munson



### 3.4.3. Le Timbre (qualité)

- ✓ **Le timbre** est la qualité physiologique qui permet de distinguer deux sons de même sonie et même tonie émis par deux instruments différents (exemple: violon, flute).
- ✓ Le timbre est lié au spectre de fréquence du son, c'est-à-dire, la richesse en harmonique et leurs amplitudes.



### 3.4.4. Autres phénomènes subjectifs

#### ❑ Superpositions de sons de fréquence voisine

Si on entend simultanément 02 sons de même intensité et de fréquence  $f_1$  et  $f_2$  très voisines, l'oreille entend un son de fréquence intermédiaire.

#### ❑ Effet masque

c'est l'élévation du seuil liminaire d'un son par l'audition simultanée d'un autre son plus intense, et ce dernier (le plus intense) est appelé le son masquant.

- Un son intense masque le son faible
- Un son grave masque un son aiguë

#### ❑ Fatigue auditive

c'est l'augmentation du seuil absolu (minimum audible) après audition d'un son fort

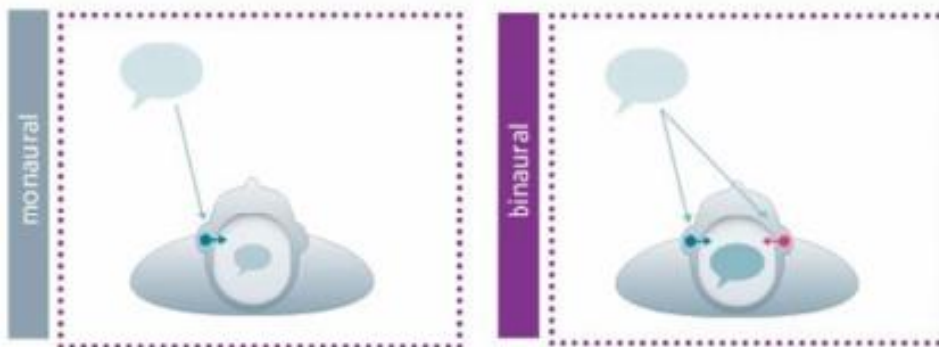
Cette fatigue augmente avec l'intensité du son et sa durée et elle est plus marquée pour les sons aiguës

## ❑ Audition binaurale

- ✓ L'audition normale fait appel aux 2 oreilles : c'est l'audition binaurale
- ✓ L'audition binaurale a deux avantages:
- ❖ abaissement des seuils liminaires, : on va gagner environ 3dB avec le deuxième oreille
- ❖ orientation auditive: est due essentiellement à deux facteurs
  - **La différence de phase** : le son met plus de temps pour atteindre l'œil la plus éloigné
  - **La différence d'intensité** : du fait de l'effet ombre de la tête, l'oreille du côté du son entend avec plus d'intensité que l'oreille opposé

### Abaisssement du seuil liminaire

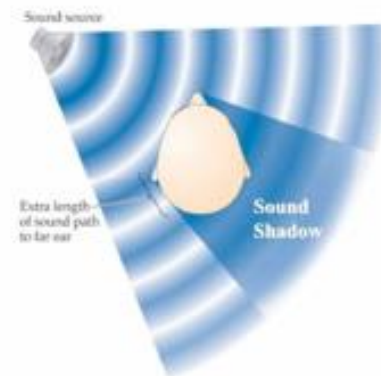
Gain de 3 dB



### Localisation de l'origine spatiale des sons

Différence de phase

Différence d'intensité



### 3.5. Explorations fonctionnelles de l'audition

#### ❑ Troubles de l'audition

- ✓ **Surdité de transmission** : Elles ont pour origine, souvent, des troubles d'ordre mécanique au niveau du tympan ou de la chaîne des osselets. La chirurgie est une arme souvent efficace.
- ✓ **Surdité de perception** : Elles affectent l'oreille interne, il est plus difficile d'y accéder par la chirurgie. Il est alors fait appel aux prothèses auditives (à fréquence et intensité variable) pour permettre de lutter contre ce type de surdités.
- La fatigue auditive correspond à une surdité de perception : la phase de récupération est plus ou moins longue selon l'intensité du son qui a provoqué cette fatigue auditive (après l'audition d'un son suffisamment intense, les performances de l'oreille deviennent moins bonne).
- ✓ **Surdité mixte** : Il s'agit d'affections qui combinent les deux premiers types.

## ❑ Exploration de la fonction auditive

On distingue deux types de méthodes :

### (i) Méthodes subjectives :

Il faut la coopération du sujet et les résultats varient d'un sujet à un autre.

#### ✓ Acoumétrie

Il s'agit d'une méthode subjective qui fait appel à la coopération du patient (les méthodes les plus anciennes) : exemple de la voix chuchotée entendue à 6 mètres

- Autre exemple : épreuve de Weber.

#### ✓ Audiométrie

Il s'agit également d'une méthode subjective

Un générateur de sons purs (audiomètre), et de fréquences variables (croissantes selon une échelle logarithmique), est utilisé. Les résultats peuvent être exprimés en décibels.



## **(ii) Méthodes objectives :**

### **✓ Les méthodes reflexes**

Provoquer un mouvement involontaire par une stimulation d'intensité assez forte.

### **✓ Les méthodes électrophysiologiques**

Une structure sensorielle émet des signaux électriques. Les recueillir et les visualiser permet d'évaluer la fonction auditive.

#### Exemple de l'Electro-cochleographie:

Il s'agit de l'enregistrement de potentiels nerveux émis par le nerf auditif au départ de la cochlée en réponse à des stimulations sonores brèves.