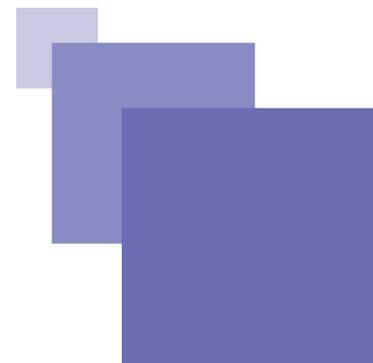


# **Grain 1.1 : L'oreille comme capteur**

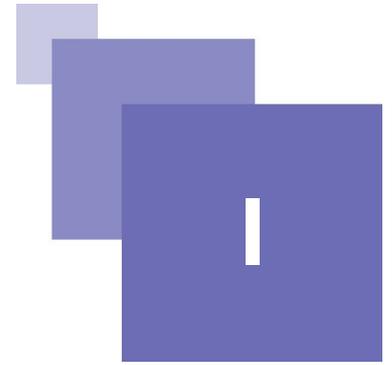
ERIC BAVU ET HERVÉ LISSEK

# Table des matières



<b>I - Présentation et test d'entrée</b>	<b>5</b>
A. Introduction.....	5
B. Exercice : Questionnaire d'entrée.....	5
C. Testez vos prérequis.....	6
<b>II - Présentation générale de l'oreille humaine</b>	<b>9</b>
<b>III - L'oreille externe</b>	<b>11</b>
<b>IV - L'oreille moyenne</b>	<b>15</b>
A. Le tympan.....	15
B. La chaîne d'osselets de l'oreille moyenne.....	16
<b>V - L'oreille interne</b>	<b>19</b>
<b>VI - Conclusion et test de sortie</b>	<b>21</b>
A. Synthèse des acquis.....	21
B. Testez vos acquis.....	22
C. Exercice.....	22
<b>VII - Bibliographie</b>	<b>25</b>

# Présentation et test d'entrée



Introduction	5
Exercice : Questionnaire d'entrée	5
Testez vos prérequis	6

## A. Introduction

### *Objectifs*

L'objectif de ce grain est de :

- Présenter succinctement les mécanismes généraux de l'audition humaine
- Introduire les mécanismes physiques et les phénomènes de transduction qui interviendront en électroacoustique grâce à l'oreille, qui peut être vue au sens large comme un transducteur électro-mécano-acoustique
- Introduire les outils liés aux capteurs (fonction de transfert, sensibilité, loi entrée-sortie)
- Lier la perception auditive de l'intensité sonore aux indicateurs objectifs (phénomènes physiques)

### *Prérequis*

Les prérequis de ce grain sont :

- Notions de fonctions de transfert (lois entrée/sortie)
- Notions de mécanique du point

## B. Exercice : Questionnaire d'entrée

*Voici un schéma général de l'oreille, que nous étudierons plus précisément dans la suite. Observez les différentes parties de ce schéma en passant la souris sur le schéma (oreille externe, oreille moyenne, et oreille interne), qui vous servira à répondre au test d'entrée de ce grain :*

*L'oreille est composée de 3 parties distinctes, visibles sur le schéma précédent. À quel(s) domaine(s) physique(s) sont associés ces parties anatomiques (cocher les cases du tableau suivant) ?*

	Fluide	Solide	Electricité
Oreille externe	1	2	3
Oreille moyenne	4	5	6
Oreille interne	7	8	9

- Zone 1
- Zone 2
- Zone 3
- Zone 4
- Zone 5
- Zone 6
- Zone 7
- Zone 8
- Zone 9

## C. Testez vos prérequis

### Exercice 1

*L'ensemble pavillon/conque amplifie-t-il les sons ?*

Oui

Non

### Exercice 2

*Nous sommes sensibles de manière uniforme aux ondes sonores à toutes les hauteurs (notes musicales) ?*

Oui

Non

### Exercice 3

---

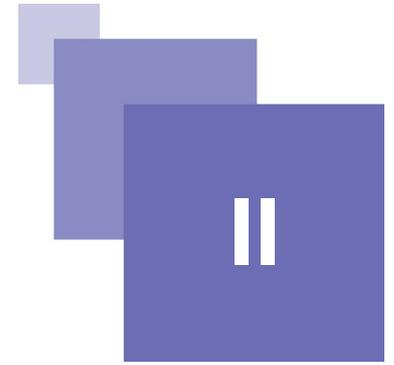
*Le tympan ne vibre jamais.*

Oui

Non

---

# Présentation générale de l'oreille humaine

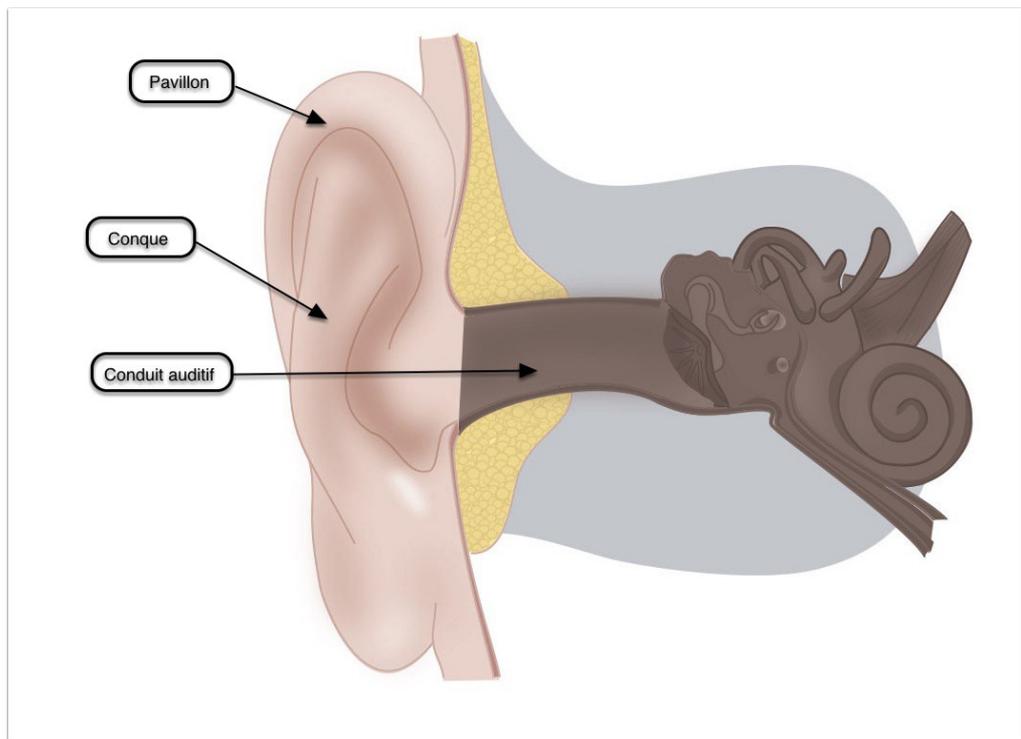


- L'oreille est le siège d'une captation de la pression acoustique (stimulus), transformée en influx nerveux au cerveau (perception).
- Le stimulus résulte de la transmission aérienne d'une perturbation acoustique du milieu aérien 3D vers le tympan.
- Description séquentielle à partir de l'animation :
  - Passage d'une perturbation acoustique jusqu'au tympan, qui vibre : **transduction acousto-mécanique**
  - Vibration transmise via les osselets de l'oreille moyenne jusqu'à la fenêtre ovale. L'une des fonctions de ces osselets est d'augmenter le transfert d'énergie du milieu aérien (extérieur) à un milieu liquide dans lequel baigne l'oreille interne et en particulier la cochlée (on appelle ce phénomène l'adaptation d'impédance)
  - Il s'en suit une mise en vibration des organes de l'oreille interne, et en particulier de cellules spécialisées qui transmettent l'information au cerveau, ce qui correspond à une **transduction mécano-électrique**.

# L'oreille externe



## *Le pavillon et la conque : un cornet acoustique*



*Schéma créé par Éric Bavu*

- Rôle global de captation des sons extérieurs et de canalisation vers le conduit et le tympan.
- Conque - pavillon : Rôle d'adaptation d'impédance (optimisation du transfert vers le conduit).
- Rôle d'amplificateur (résonances). Conque : résonance autour de 5000 Hz.

## Le conduit auditif : rôle de résonateur

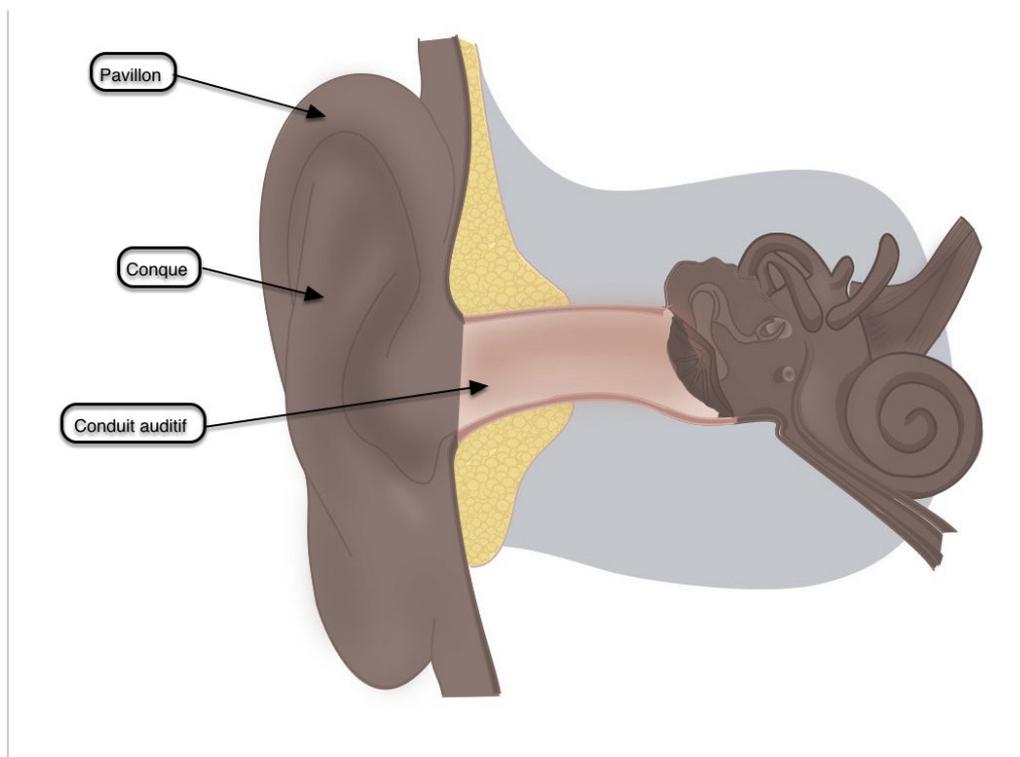


Schéma créé par Éric Bavu

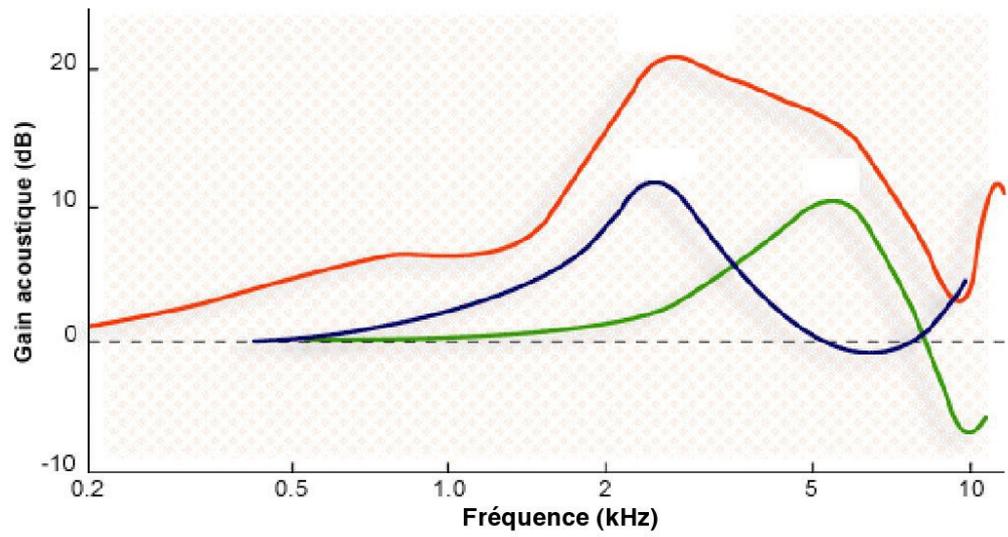
Pour comprendre la notion de résonateur, consultez le grain 2.3 - partie 2<sup>1</sup>, chapitre "Propagation en tube long", avec exemples

- Le conduit auditif se comporte comme un tube fermé à une extrémité (par le tympan) et ouvert de l'autre.
- Ce type de tube s'appelle un guide d'onde, qui est le siège d'un phénomène de résonance, lié à sa longueur – comme un tuyau d'orgue, dont la note dépend de la longueur du tube.
- La fréquence de résonance du conduit auditif se situe vers 3400 Hz. Résonance quart d'onde, qui permet de lier fréquence de résonance et longueur  $l_c$  du tube :  $f = \frac{c}{4l_c}$ , avec  $c = 343m.s^{-1}$  la célérité des ondes sonores dans l'air.
- On en déduit que la sensibilité auditive est maximale dans la plage 1 kHz - 4 kHz (majoritairement grâce à l'oreille externe).
- Le tympan est l'élément qui délimite l'oreille externe et l'oreille moyenne

### Courbe d'amplification totale due à l'oreille externe

La courbe en bleu représente l'amplification due au conduit auditif (maximum autour de 2500 Hz), la courbe en vert l'amplification due au pavillon et à la conque (maximum autour de 5000 Hz), et la courbe en rouge est l'amplification totale due à l'oreille externe et moyenne.

On peut constater que l'essentiel de la sensibilité auditive s'explique grâce aux phénomènes d'amplifications de l'oreille externe, puisque la courbe rouge est très proche de la somme des courbes bleues et vertes. Le reste provient de phénomènes dans l'oreille moyenne et interne.



Source de l'image : [www.cochlea.eu/oreille-generalites/oreille-externe](http://www.cochlea.eu/oreille-generalites/oreille-externe)

# L'oreille moyenne

IV

Le tympan	15
La chaîne d'osselets de l'oreille moyenne	16

## A. Le tympan

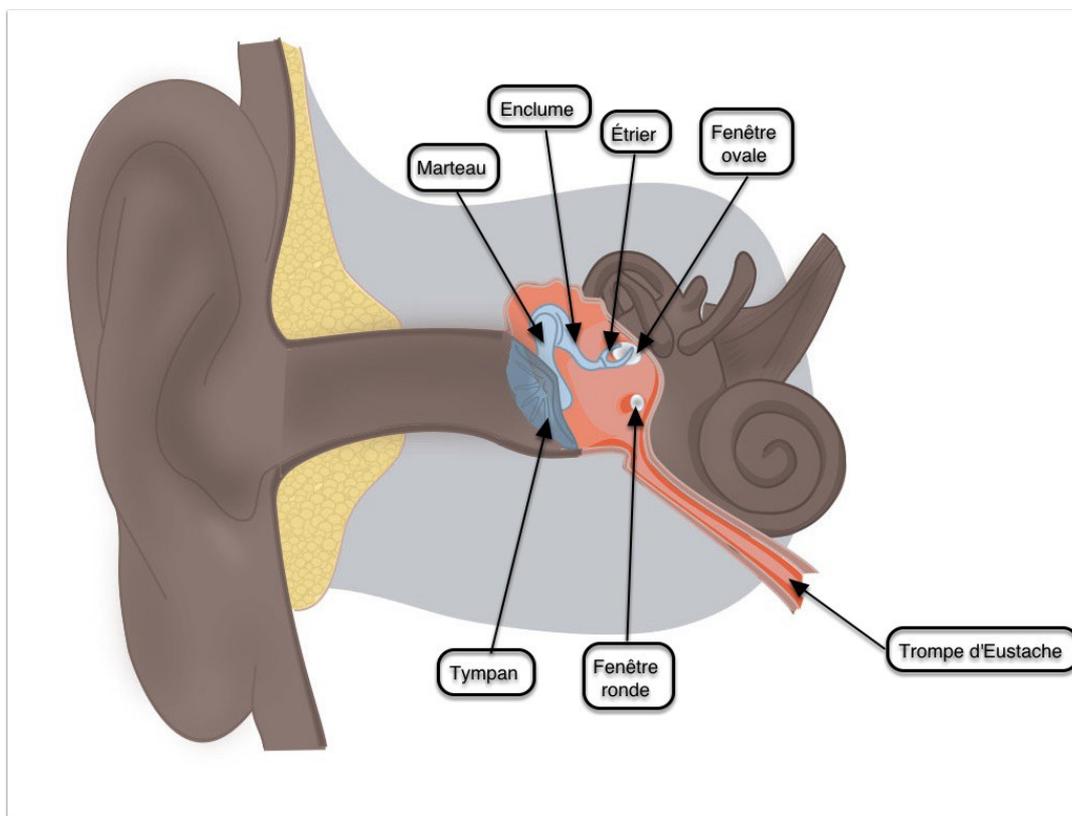
- Le tympan est une membrane élastique, fine et légère (la surface du tympan est de l'ordre de  $60 \text{ mm}^2$ , et son épaisseur est de l'ordre de  $100 \text{ microns}$ ).
- Cette membrane est mise en mouvement par la perturbation acoustique préalablement guidée et amplifiée par le conduit auditif.
- Le tympan peut être comparé à la membrane d'un microphone.
- Le tympan réalise ce qu'on appelle un couplage (ou une transduction acousto-mécanique (voir *grain 3.1*<sup>2</sup> pour comprendre en détail).
- Le tympan transforme la pression acoustique  $P$  acoustique et le débit  $w = Sv$ , où  $S$  est la section du conduit auditif, et  $v$  la vitesse acoustique (voir définitions au *grain 1.2*<sup>3</sup>) dans le conduit auditif en force mécanique et vitesse vibratoire à travers l'oreille moyenne, jusqu'à l'oreille interne.

2 - ../Grain3.1/index.html

3 - ../Grain1.2/index.html

## B. La chaîne d'osselets de l'oreille moyenne

### Anatomie

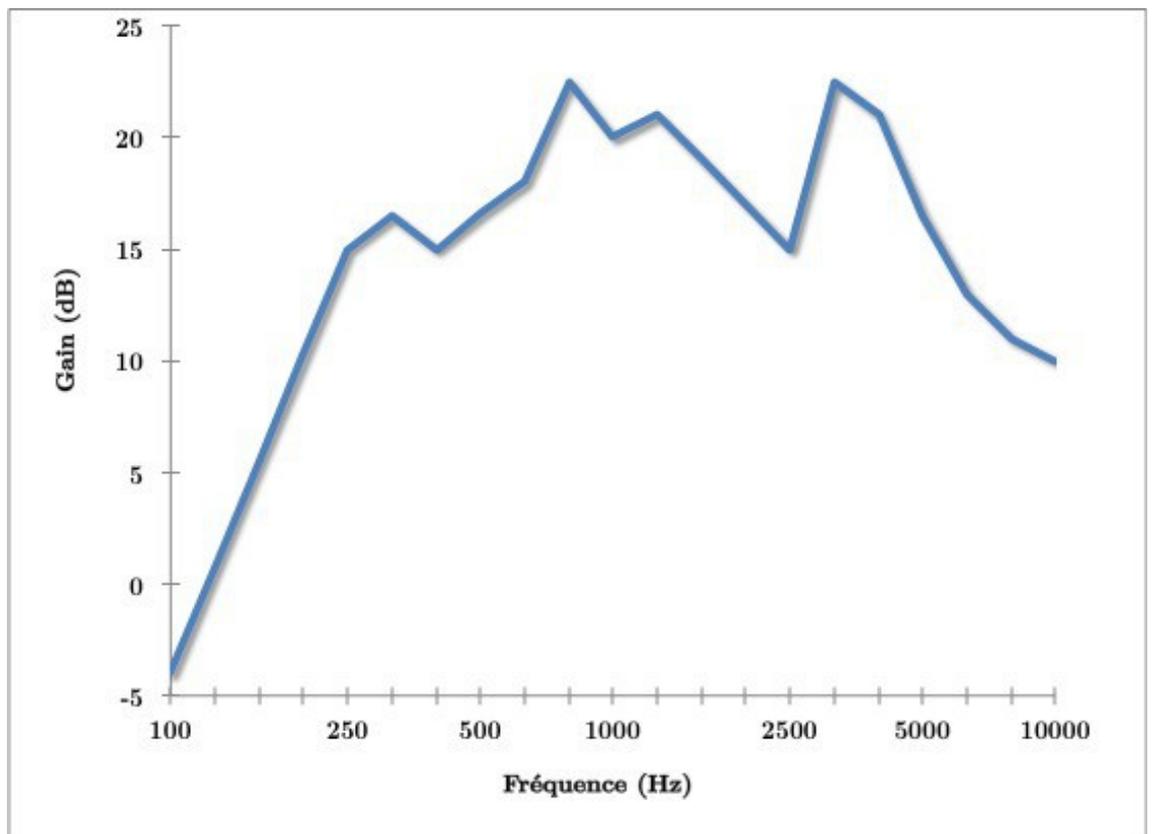


Crédit image : Éric Bavu

- Sert essentiellement de lien entre l'oreille externe et l'oreille interne
- Sert à transmettre efficacement les vibrations du milieu aérien à un milieu liquidien

### Rôle

- Les osselets jouent le rôle d'adaptateur d'impédance (p/v) entre l'air et la périlymphe. En pratique, cela signifie qu'ils facilitent le transfert d'énergie entre ces deux milieux. En effet, la résistance au passage de l'onde dans la périlymphe est de l'ordre de 5000 fois plus grande que dans l'air, ce qui nécessite d'insérer un mécanisme d'adaptation pour faciliter les échanges énergétiques. Lien vers les impédances : *grain 2.3.2*<sup>4</sup>
- Sans ces osselets, la transmission à l'oreille interne serait environ 100 fois moins efficace
- Remarque : cette adaptation d'impédance dépend de la fréquence, c'est à dire que la transmission à l'oreille interne n'est pas aussi efficace dans tous les domaines de fréquences (voir schéma page suivante).

*Remarque : fonction de transfert de l'oreille moyenne*Crédit image : *Éric Bavu**Mouvement des osselets de l'oreille moyenne*

Réflexe stapédien (mécanisme de protection)

- Si un son est détecté par le cerveau à plus de 80 dB SPL, l'information est transmise aux noyaux du tronc cérébral
- Une boucle de rétroaction réflexe commande la contraction des muscles, rigidifiant ainsi la chaîne ossiculaire de l'oreille moyenne
- Grâce à cette rigidité accrue, l'énergie transmise à l'oreille interne est donc minimisée
- Ce mécanisme permet que les cellules ciliées de l'oreille interne ne soient pas trop endommagées par des sons de forte intensité.

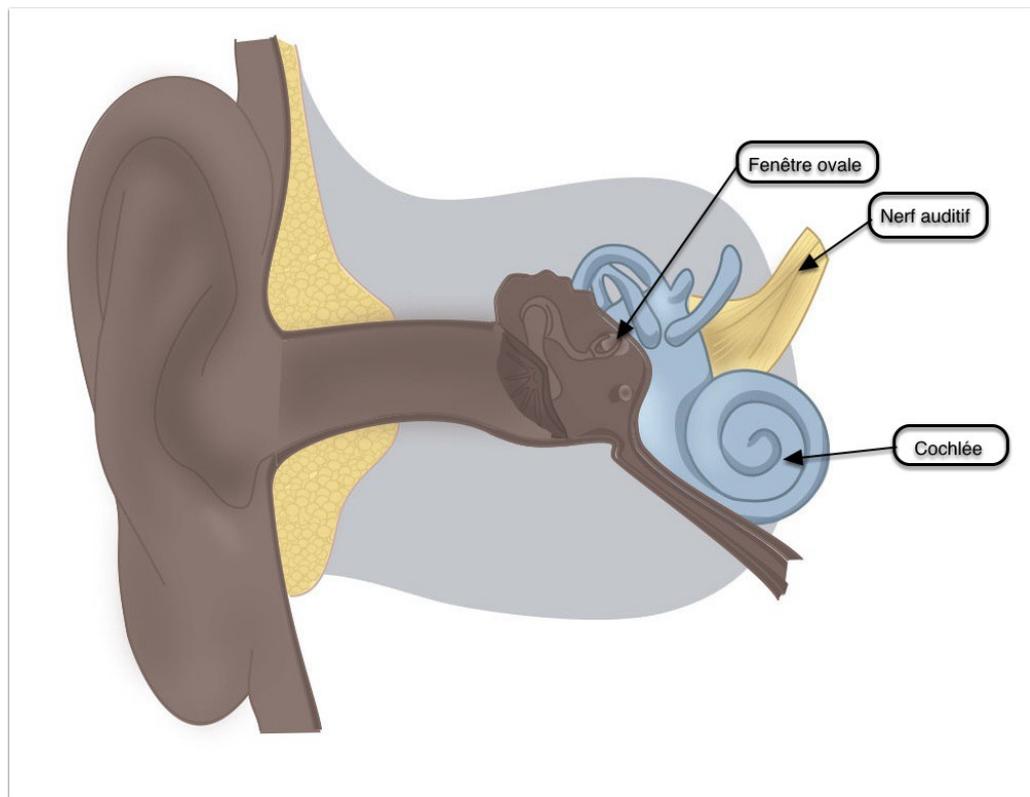
Attention : ce réflexe a ses limites !

- il est fatigable (très rapidement)
- il ne fonctionne que pour des fréquences plus basses que 2000 Hz
- la réduction du niveau de vibration au niveau de la cochlée n'est que de 10 ou 20 dB maximum
- ce mécanisme n'intervient pas (ou tardivement) pour des sons impulsionnels, puisqu'il existe un temps de latence à l'établissement du réflexe, de l'ordre de 30 ms

# L'oreille interne

V

## *La cochlée, organe de l'audition*



La **cochlée** est l'organe en forme de colimaçon dans lequel les ondes acoustiques et vibratoires sont transformées en impulsions nerveuses.

## *La transformation en information électrique*

- La fenêtré ovale, mise en mouvement par l'étrier, transmet une onde acoustique aux fluides dans lesquels baignent les différents organes de l'oreille interne (dans la cochlée).
- L'oreille interne a deux fonctionnalités: elle est à la fois le siège de l'équilibre (non étudié ici) et le siège des organes spécialisés de l'audition.
- Des cellules spécialisées connectées au cerveau (par les **fibres nerveuses**) sont mises en mouvement oscillatoire par l'onde dans les fluides, transmettant une impulsion électrique au cerveau à chaque mouvement, et transformant ainsi la vibration mécanique de la fenêtré ovale en influx nerveux.
- La cochlée est ainsi le siège d'une **transduction mécano-électrique**.

# Conclusion et test de sortie

VI

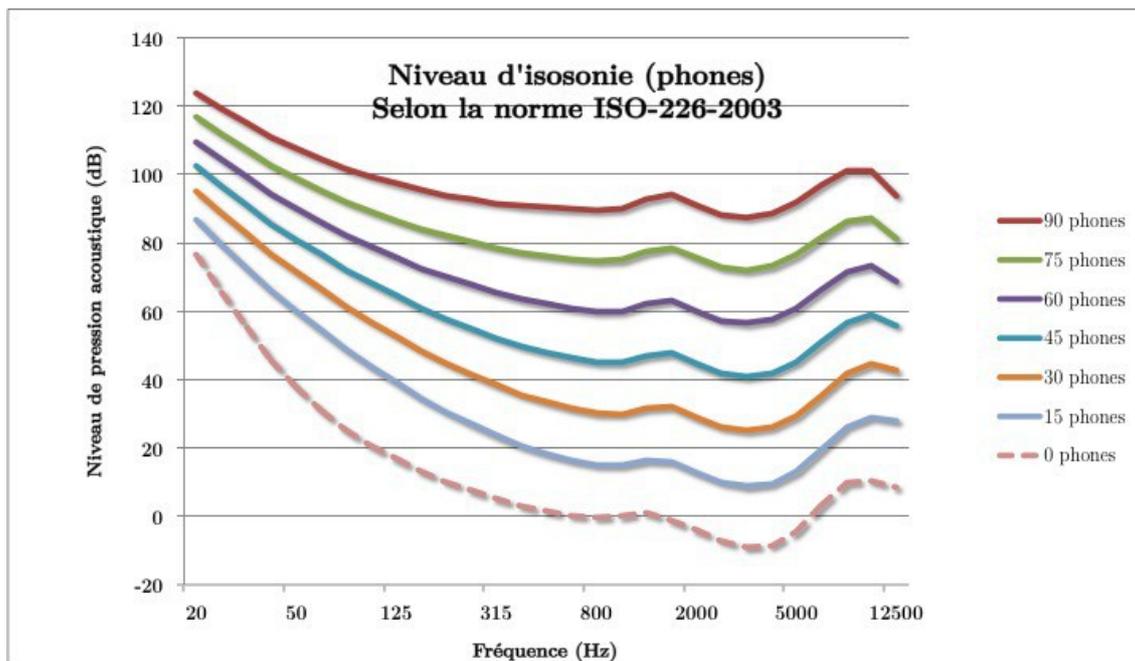
Synthèse des acquis	21
Testez vos acquis	22
Exercice	22

## A. Synthèse des acquis

- Ce cours a permis d'introduire le fonctionnement général de l'audition humaine
- Les trois domaines de la physique rencontrés en électroacoustique sont représentés (électrique, mécanique et acoustique)
- Les différentes transformation d'énergie mises en lumières sont introduites comme des **transductions électroacoustiques**
- Les composants du systèmes auditif ne sont pas aussi efficaces dans tous les domaines de fréquences, résultant en une sensibilité de l'audition dépendant de la fréquence

### *En savoir plus : lignes isosoniques*

- Les **courbes isosoniques** (voir graphique ci après) sont obtenues en inversant les courbes de sensibilité de l'oreille (voir par ex. la courbe d'amplification) pour différents niveaux d'excitation.
- Sur une même courbe, on peut lire le gain (en dB) à appliquer à un signal de fréquence  $f$  pour provoquer la même **sensation** d'intensité sonore pour l'oreille humaine qu'un signal de référence de fréquence  $f_0 = 1$  kHz et de niveau de pression acoustique  $L_{p0}$ . La sonie mesure ainsi une **sensation** et non pas une **excitation**.



Crédit image : Eric Bavu

## B. Testez vos acquis

### Exercice 1

Le système pavillon/conque résonne à des fréquences plus basses que le conduit auditif.

Oui

Non

### Exercice 2

Les osselets transmettent une information nerveuse au cerveau.

Oui

Non

## C. Exercice

Calculez la longueur  $lc$  du conduit auditif, sachant que la fréquence de résonance du résonateur 1/4 d'onde correspondant est  $fc = 3400Hz$

**Réponse :**  $l_c = \frac{c}{4f_c} = 2.5cm$  si on considère  $c = 343m.s^{-1}$

# Bibliographie



VII

- ISO 226:2003, *Acoustique – Lignes isosoniques normales*
- M. Rossi, *Audio*, Presses Polytechniques Universitaires Romandes, Lausanne, 2007
- G. von Békésy, *Experiments in Hearing*, Mc Graw-Hill, New York, 1960
- H. Fastl, E. Zwicker, *Psychoacoustics: Facts and Models*, Springer, 3eme édition, 2007