

Son et musique, porteurs d'information

Lors d'un concert, de nombreux instruments jouent ensemble. Les musiciens utilisent des partitions parfois très anciennes contenant toutes les informations nécessaires leur permettant de jouer un morceau. La musique peut être enregistrée sur un support informatique. Cependant le volume sonore peut être très élevé.

Comment des instruments peuvent-ils créer de la musique à partir d'une partition ?

Comment ces sons peuvent-ils être enregistrés sur un support numérique ?

Comment les sons sont-ils perçus par les êtres humains et peuvent-ils être dangereux pour l'audition ?

I. le son, phénomène vibratoire (PC)

1.1. Le son - généralités

- La propagation d'un son correspond à des vibrations qui se transmettent de proche en proche dans un milieu matériel. Dans le vide, en l'absence de milieu matériel, les signaux sonores ne se propagent pas (figure 1).



Figure 1 : La caisse de résonance d'un violon permet d'augmenter l'amplitude de la vibration sonore émise.

- Pour produire un son, un instrument de musique doit vibrer et émettre. Il comporte un système vibrant (ex : corde pour une guitare) et une caisse de résonance qui permet l'émission en transmettant les vibrations au milieu environnant (figure 2).

Figure 2 : Le son résultat d'une explosion spatiale ne se propage pas dans le vide.



- Si on enregistre le son produit par un instrument de musique à l'aide d'un micro, on obtient un signal qui est **périodique**. On distingue :
 - les **sons purs** pour lesquels le signal associé correspond à une sinusoïde (figure 3) ;
 - les **sons composés** pour lesquels le signal associé est périodique mais non sinusoïdal (figure 4).

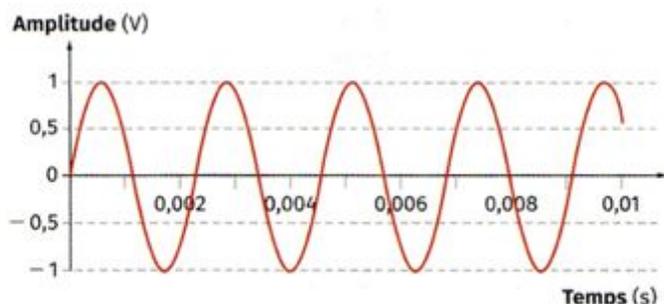


Figure 3 : Signal associé à un son pur

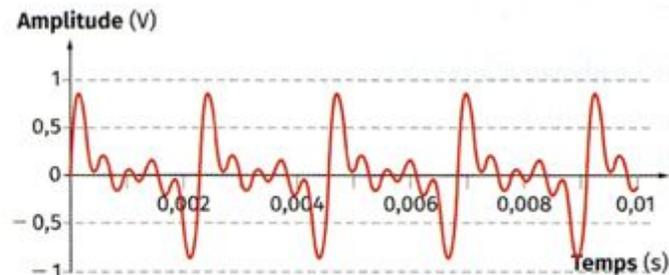


Figure 4 : Signal associé à un son composé

1.2 Caractéristiques d'un signal sonore périodique

- Un signal sonore périodique est caractérisé par période T (= plus petite durée au bout de laquelle le signal se répète) ou sa fréquence f (= nombre de répétitions du signal par unité de temps) (figure 5). Ces deux grandeurs sont reliées par :

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{ou} \quad T = \frac{1}{f} \quad \text{avec } f \text{ en hertz (Hz) et } T \text{ en seconde (s)}$$

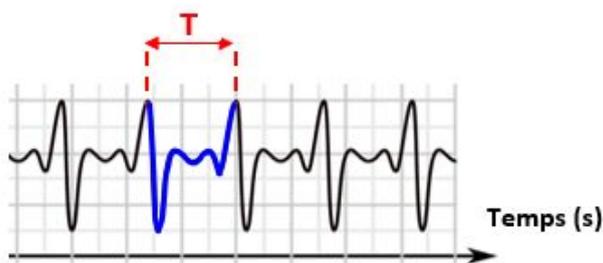


Figure 5 : En bleu est représenté le motif du signal périodique. La durée du motif correspond à la période T .

- Un son produit par un instrument de musique est caractérisé par sa hauteur (ce qui correspond à la note jouée) et par son timbre. Ces propriétés auditives sont liées respectivement à la fréquence du signal périodique associé et au motif de ce signal (figure 6).

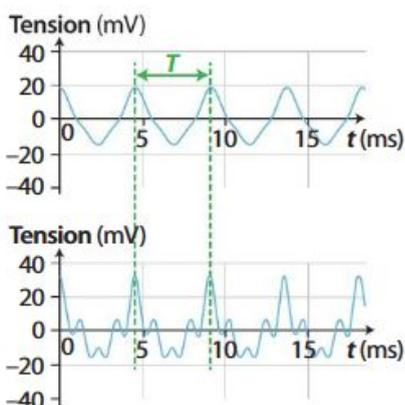


Figure 6 : Les deux signaux ont la même période, donc la même fréquence mais le motif est différent. Les deux sons associés ont donc la même hauteur mais pas le même timbre. Ils correspondent à la même note mais jouée par deux instruments différents.

- Un instrument de musique peut jouer plus ou moins fort, ce qui se traduit par un son dont la puissance sonore P (exprimée en watt W) est plus ou moins grande.

Lorsque le son se propage dans toutes les directions, la puissance sonore donnée au départ lors de l'émission se répartit sur une surface plus ou moins grande (figure 7). On définit alors l'intensité sonore I qui est la puissance par unité de surface et qui s'exprime en watt par mètre carré (W/m^2 ou $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). Plus on s'éloigne de la source, plus l'intensité sonore I diminue.

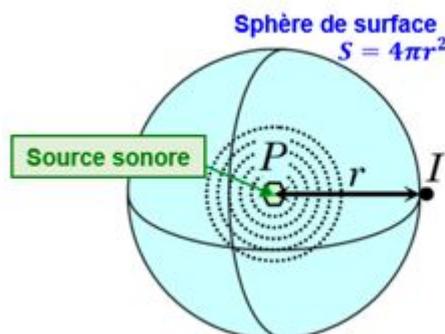


Figure 7

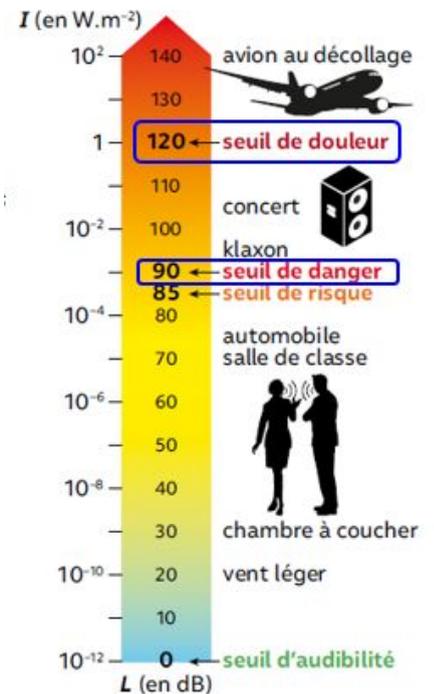
- Les valeurs des intensités sonores s'étalent sur une grande échelle d'ordres de grandeur. Il est alors plus commode de faire appel à la notion de niveau d'intensité sonore, noté L et exprimé en décibels (dB). Il se mesure à l'aide d'un sonomètre.

$$\text{niveau d'intensité sonore (en dB)} \longrightarrow L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

← intensité sonore (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
← intensité sonore du seuil d'audibilité :
 $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

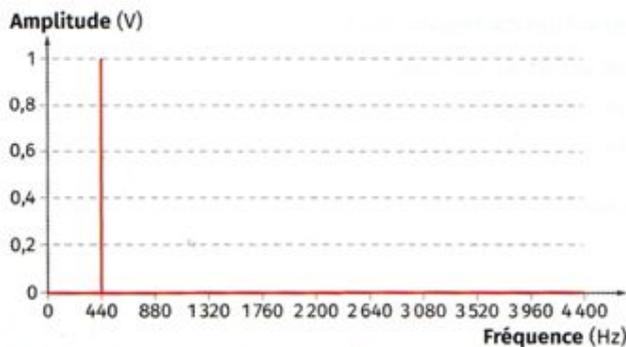
- Le niveau d'intensité sonore est représenté sur une **échelle logarithmique** (figure 8).
Si l'intensité sonore I est multipliée par 2, le niveau d'intensité sonore L augmente de 3 dB.

figure 8: échelle logarithmique des niveaux d'intensité sonore



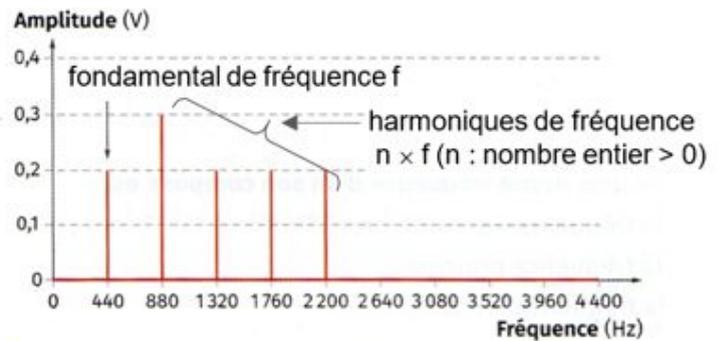
1.3 Fondamental et harmoniques

- Un signal périodique quelconque de fréquence f peut être décomposé en un ensemble de signaux sinusoïdaux de fréquences multiples de f . La fréquence f du signal est appelé la **fréquence fondamentale** et les autres fréquences **les harmoniques**.
- Un son pur ne possède pas d'harmoniques (figure 9), contrairement à un son composé qui en possède (figure 10).



► L'analyse spectrale montre la présence d'une seule fréquence constituant le signal.

Figure 9 : Spectre en fréquences d'un son pur



► L'analyse spectrale montre la présence d'une fréquence fondamentale (la première) et de fréquences harmoniques, toutes multiples de la fréquence fondamentale.

Figure 10 : Spectre en fréquences d'un son composé

- Un instrument de musique produit un **son composé**. La **fréquence du son**, qui correspond à la fréquence fondamentale, **est directement reliée à certains paramètres**.
- Dans un instrument à cordes, une corde tendue émet en vibrant un son composé dont la fréquence fondamentale dépend de :
 - **la longueur L de la corde ;**
 - **la tension de la corde ;**
 - **la masse linéique de la corde.**

Dans un instrument à vent, un phénomène analogue se produit par vibration de l'air dans un tuyau.

II. Musique et nombres (maths)

Quels liens existent entre la musique et les nombres ?

Pourquoi notre gamme comporte 7 notes ?

2-1 La musique : un art organisé.

La musique était à l'origine un art transmis oralement, mais rapidement et notamment lorsque plusieurs instruments jouent ensemble le besoin de le transcrire par écrit est apparu. Le besoin de codifier le son a entraîné l'apparition des notes et des partitions.

Vocabulaire:

- **note de musique**, c'est un son défini par quatre paramètres : hauteur (grave/aigu) intensité (fort/faible), durée (court/long), timbre (ex : piano ou violon)
- **hauteur de la note** : elle correspond à une fréquence de vibration exprimée en Hertz. L'oreille humaine est sensible au rapport entre les fréquences: quand un instrument émet une note de fréquence f , l'oreille perçoit un son de fréquence f mais aussi ses harmoniques de fréquences $2f, 3f, 4f, \dots$
- **un intervalle** entre deux notes est défini par le rapport de leurs fréquences (et non la différence).
- **une octave**: c'est l'intervalle qui sépare deux notes ayant pour fréquences respectives f et $2f$. Elles portent le même nom

Par exemple : la fréquence d'un La₃ est de $f_1 = 440$ Hz

la fréquence d'un La4 est $f_2 = 440 \times 2 = 880$ Hz

- **Une quinte** : c'est l'intervalle entre deux notes ayant pour fréquences respectives f et f
- **Consonance**: concordance d'un ensemble de sons, accords ou intervalles produisant un résultat agréable à l'oreille.
- **Gamme**: c'est une suite finie de notes réparties sur une octave (exemple: Do, Ré, Mi, Fa, Sol, La, La, Si, Do)

2-2 La construction des gammes

Pythagore, qui pensait que le monde pouvait être expliqué par les mathématiques a été le premier à relier cette science à la musique. Il est à l'origine de la première gamme. Il existe une infinité de fréquences donc de notes possibles.

Comment choisir alors les fréquences qui constituent l'ensemble des notes d'une gamme ?

a/ Les gammes de Pythagore

Dès l'Antiquité, la construction des gammes est basée sur des fractions simples ($2/1$; $3/2$; $4/3$...): les sons dont les fréquences sont dans ces rapports simples étaient alors considérés comme les seuls à être consonants.

Construction de la gamme de Pythagore (activité 3 page 204).

Pythagore s'est servi de la quinte pour définir sa gamme :

- On part d'une note de référence de fréquence f
- On travaille sur un intervalle de fréquences comprises entre f et $2f$. L'objectif étant de construire une suite de notes réparties sur une octave.
- On prend la quinte de la note de départ, en multipliant f par $3/2$. On obtient $(3/2)f$.
- On prend la quinte de la quinte, en multipliant $(3/2)f$ par $(3/2)$. On obtient $(3^2/2^2)f$. dans le cas où la fréquence trouvée n'est pas comprise entre f et $2f$, on la divise par 2.
- On réitère le passage à la quinte 12 fois, on obtient alors 12 notes.

Le cycle des quintes ne "reboucle" pas exactement sur la note départ.

La 12ème note est légèrement plus haute que l'octave de la note de départ. On impose alors que la dernière note soit réellement l'octave de la note de départ, la dernière quinte du cycle est dissonante. On l'appelle la **quinte du loup**.

On a montré en effet par un raisonnement mathématique qu'il n'y a jamais égalité entre la nième quinte et la pième octave :

pour n et p entiers naturels $\left(\frac{3}{2}\right)^n$ est proche de 2^p mais pas égal (on dit que le cycle des quintes est infini).

b/ La gamme tempérée

La gamme tempérée à 12 notes et ses intervalles. On constate que la valeur de l'intervalle reste constante entre chaque demi-ton.

Dans la gamme tempérée :

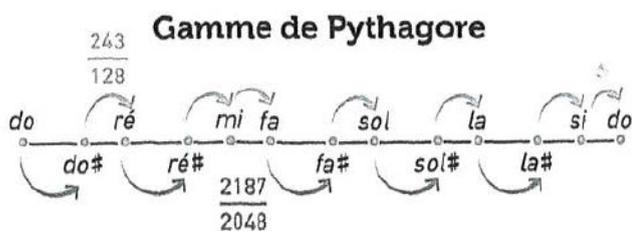
- L'octave comporte 12 notes.
- L'intervalle entre chaque demi-ton est constant et vaut $\sqrt[12]{2}$

La connaissance des **nombres irrationnels** a permis au XVIII^{ème} siècle de construire des gammes à intervalles égaux comme la gamme tempérée.

La gamme tempérée, utilisée de nos jours, est donc construite en divisant l'octave en douze intervalles égaux, appelés **demi-tons**. A chaque fois que l'on monte d'un demi-ton, la fréquence est **multipliée par $2^{1/12}$** (noté aussi $\sqrt[12]{2}$). C'est un nombre irrationnel : sa valeur approchée est 1.059.

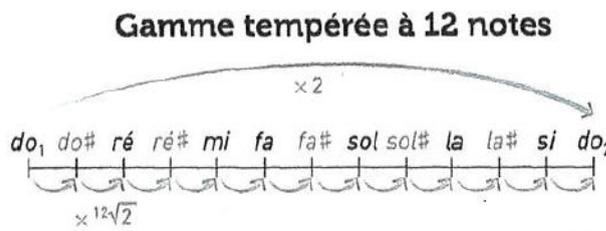
Avec une gamme tempérée, la **transposition** est plus facile qu'avec une gamme de Pythagore. La transposition consiste à décaler toutes les notes de ce morceau avec le même intervalle, vers le grave ou l'aigu. Elle est utilisée par exemple lorsqu'un chanteur est accompagné d'un instrument et que certaines notes sont trop hautes ou trop basses pour l'instrument utilisé.

En résumé.



Les intervalles entre notes consécutives ne sont pas égaux.

transposition difficile



Tous les intervalles sont égaux et valent $\sqrt[12]{2}$.

transposition facile

c/ Conclusion: lien entre mathématiques et musique.

Pour construire sa gamme, Pythagore a utilisé des fractions simples: 2/1, 3/2, 4/3 etc. Cette méthode qui liait les fréquences des notes à des fractions a permis de construire la gamme des 12 notes. Cependant, elle utilise une approximation: le comma et possède une quinte dissonante.

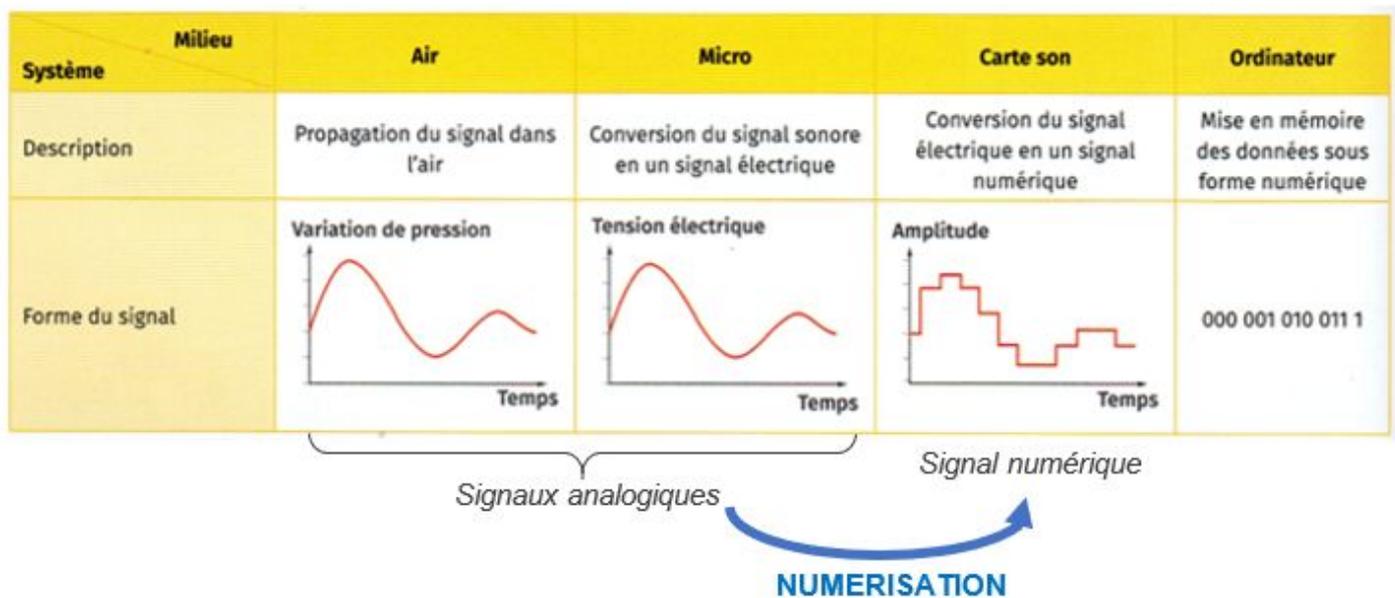
Les musiciens ont cherché une nouvelle méthode pour construire la gamme des 12 notes qui pallierait à cet inconvénient. A la fin du XVI^{ème} siècle, Simon Stevin a l'idée de partager une octave en 12 intervalles égaux mais il faudra attendre une centaine d'années pour penser à utiliser des nombres irrationnels. La gamme tempérée s'imposera ensuite sous l'impulsion de Jean-Philippe Rameau (XVII^{ème}) et Jean-Sébastien Bach (XVIII^{ème}).

III. Le son, une information à coder (PC)

3.1. Numérisation d'un signal analogique

Numérisation d'un son

- Un son engendre des variations de pression de l'air qu'un microphone peut transformer en signal électrique continu, autrement dit pouvant prendre une infinité de valeurs.
- Pour être stockés ou transmis dans un environnement informatisé qui utilise un langage binaire, ces signaux doivent être numérisés, c'est-à-dire convertis en signaux numériques. C'est le rôle du convertisseur analogique-numérique (CAN). Les signaux numériques sont discontinus.
- La numérisation d'un signal nécessite deux étapes : l'**échantillonnage** et la **quantification**.



Echantillonnage et quantification

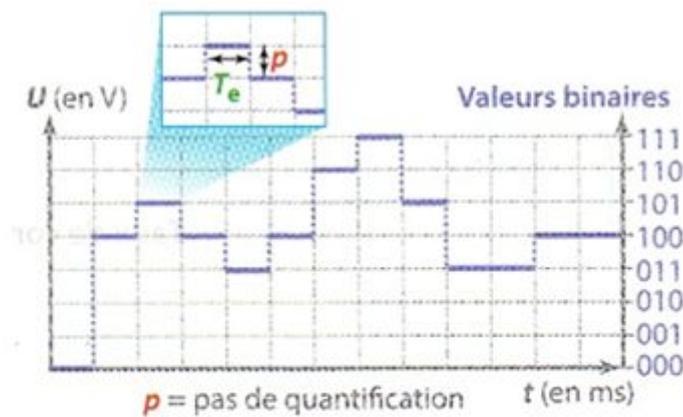
- L'**échantillonnage** consiste à prélever, à intervalles de temps réguliers T_e , l'information portée par le signal.
La **fréquence d'échantillonnage** f_e est le nombre de prélèvements effectués par seconde. Elle s'exprime en hertz (Hz).
- La **quantification** consiste à donner une valeur à l'échantillon prélevé, cette valeur étant quantifiée, c'est-à-dire ne pouvant prendre que des valeurs permises.
Le nombre de valeurs permises dépend du nombre de bits utilisés pour la quantification :
Si n est le nombre de bits utilisés, le nombre de valeurs permises est 2^n

Les paramètres de numérisation

- Une numérisation de bonne qualité doit permettre d'obtenir un signal numérique aussi fidèle que possible au signal analogique initial.
- La fidélité est d'autant plus grande que :
 - la fréquence d'échantillonnage est élevée ;
 - le nombre de bits utilisés est important.

En contrepartie la taille du fichier numérisé sera plus grande.

- **Critère de Shannon** : pour qu'un signal numérique soit suffisamment fidèle au signal analogique de départ, la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure au double de la fréquence maximale contenue dans le signal analogique : $f_e > 2 \times f_{\max}$.



$$\text{en s } T_e = \frac{1}{f_e} \text{ en Hz}$$

Le pas de quantification détermine l'écart entre deux valeurs permises.

3.2. Taille et compression des fichiers

Taille d'un fichier son

- La taille d'un fichier est liée au nombre de valeurs possibles en succession de 0 et de 1 pour retranscrire de façon numérique le signal voulu, autrement dit au **nombre de bits utilisés pour le codage**.
- La taille d'un fichier dépend des **caractéristiques de la numérisation** (fréquence d'échantillonnage f_e , nombre de bits n utilisés pour la quantification), de la durée Δt **du fichier son** et du **type d'enregistrement** ($k = 1$ pour un enregistrement en mono, $k = 2$ pour un enregistrement en stéréo).

$$\text{Taille d'un fichier (en bits)} : T = f_e \times n \times \Delta t \times k$$

$$\text{Taille d'un fichier (en octets)} : T = f_e \times \frac{n}{8} \times \Delta t \times k$$

Remarque : Ces relations sont la plupart du temps fournies. Il faut donc connaître la signification de chaque terme pour savoir exploiter ces deux formules.

Compression d'un fichier son

- La **compression** consiste à **diminuer**, après numérisation, **la taille d'un fichier** afin de faciliter son stockage et sa transmission.
- Les techniques de compression spécifiques au son, dites « avec perte d'information », éliminent les informations sonores auxquelles l'oreille est peu sensible.
- La compression est un **compromis** entre la taille du fichier et la qualité sonore de ce dernier.

Format	Qualité	Taille du fichier pour une durée de 2 minutes
MP3 128 kbit/s	*	1,9 Mo
MP3 320 kbit/s	***	4,8 Mo
AAC 320 kbit/s	****	4,8 Mo
WAV	*****	21,6 Mo

- Le **taux de compression** est (généralement) défini par :

$$\tau = \frac{\text{taille du fichier compressé}}{\text{taille du fichier initial}}$$

Remarque : Cette définition peut varier, ainsi la relation est souvent précisée dans les exercices. Il faut néanmoins savoir l'exploiter.

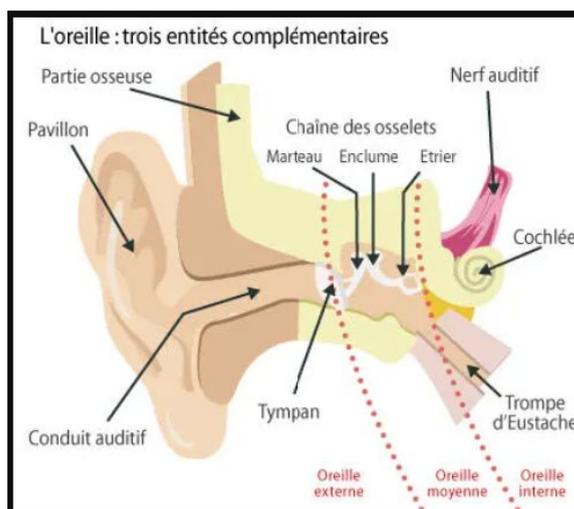
IV. Entendre la musique (SVT)

4-1 L'oreille, organe de l'audition (Activité 1 SVT)

L'oreille humaine est capable de percevoir un son dont la fréquence est comprise entre 20 Hz et 20 000 Hz. En comparaison, le chien perçoit des sons dont la fréquence va jusqu'à 50 000 Hz.

La vibration de l'air est captée par le **pavillon externe** de l'oreille, canalisée dans le **conduit auditif** et vient faire vibrer le **tympan** (voir schéma). La vibration du tympan est transmise aux **osselets** de l'oreille interne qui vont l'amplifier et faire vibrer une **membrane** sur la fenêtre ovale de la **cochlée**.

Figure 11: schéma de l'oreille



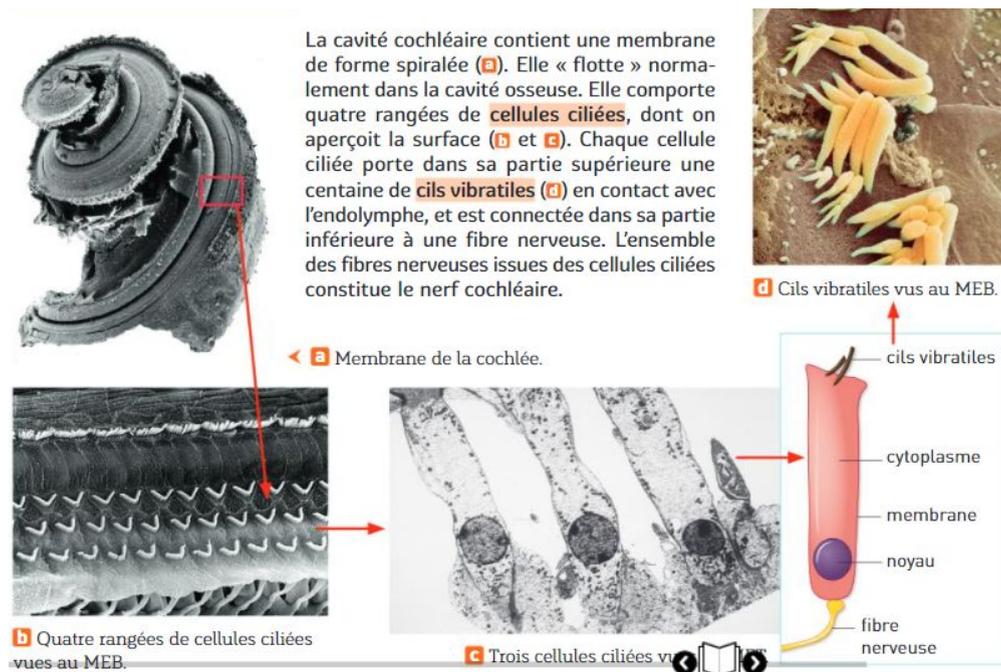


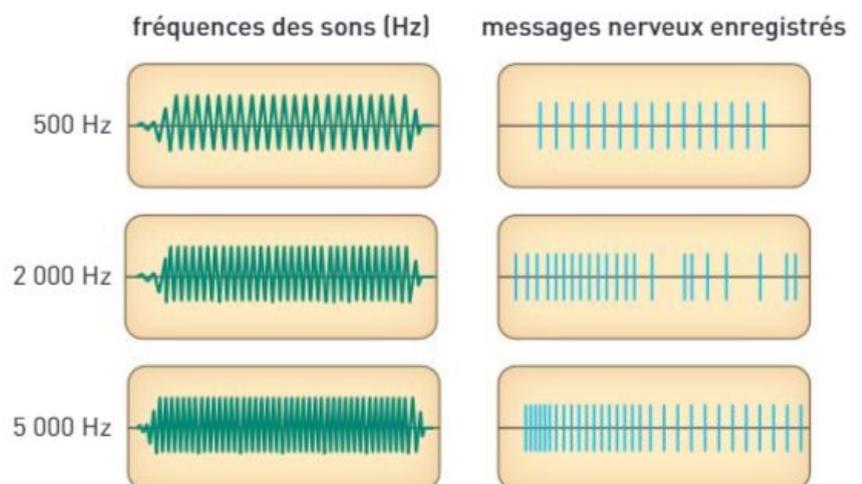
Fig 12 :la structure de la cochlée

Dans la cochlée, la vibration se propage dans un liquide : la **lymphe**. Les vibrations de la lymphe se propagent dans les cavités et activent les **cellules ciliées** par l'intermédiaire de leurs **cils vibratiles** à différents niveaux de la cochlée en fonction de leur fréquence.

Les cellules ciliées vont transmettre un message de nature électrique au cerveau par l'intermédiaire du nerf auditif.

Figure 13 : message nerveux produit par les cellules ciliées en fonction de la fréquence des sons

rq:les sons sont de même hauteur et de même intensité.

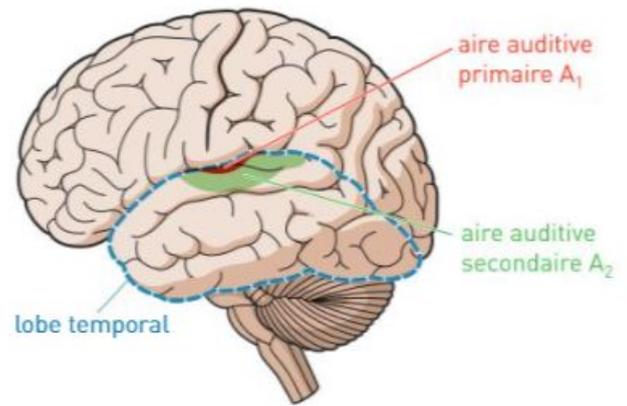


Les cellules ciliées convertissent cette vibration en message nerveux de nature électrique. Ce message nerveux transmet les caractéristiques du son perçus (**fréquence et intensité**) au cerveau par l'intermédiaire du **nerf auditif**.

4-2 : cerveau et perception auditive (Activité 2_SVT)

Le message nerveux transmis par le nerf auditif parvient à une zone précise du cerveau. C'est l'**aire auditive primaire** située dans le **lobe temporal**. (Remarque : on trouve 2 aires auditives primaires : une dans chaque hémisphère).

Figure 14: aire auditive primaire auditive



Cette aire cérébrale associée à des **aires spécialisées** (reconnaissance des mots, des sons, mémoire auditive...) va traiter l'information portée par le message nerveux et permettre l'interprétation de l'environnement sonore : reconnaissance des voix, des bruits, d'une mélodie...

L'apprentissage (d'un instrument de musique par exemple) va permettre de développer des facultés auditives particulières. Ces facultés reposent sur des modifications de la structure et du fonctionnement cérébral. On parle alors de **plasticité cérébrale**.

4-3 Musique et risques auditifs (Activité 3_SVT)

Chez l'Homme, les cellules ciliées existent en un nombre limité dans l'oreille interne. Les cils vibratiles sont très fragiles et peuvent être détruits d'une manière irréversible suite à une exposition sonore trop intense et/ou trop prolongée. Cette destruction a pour conséquence des troubles auditifs qui peuvent aller jusqu'à une surdité profonde.

Afin de préserver son audition, l'homme doit avoir un comportement responsable et écouter de la musique à un **niveau modéré et sur une durée limitée** ou bien utiliser des **moyens de protection** adaptés à un niveau sonore élevé : bouchon d'oreille, casque anti-bruit...