

# ENSEIGNEMENT SCIENTIFIQUE

## THEME 4 : LE SON

L'être humain perçoit le monde à l'aide de signaux dont certains sont de nature sonore. De l'Antiquité jusqu'à nos jours, il a combiné les sons de manière harmonieuse pour en faire un art, la musique, qui entretient des liens privilégiés avec les mathématiques. L'informatique permet aujourd'hui de numériser les sons et la musique.

La compréhension des mécanismes auditifs s'inscrit dans une perspective d'éducation à la santé.

### 1- Le son, phénomène vibratoire

La banalité du son dans l'environnement cache une réalité physique précise.

### 2-La musique ou l'art de faire entendre les nombres

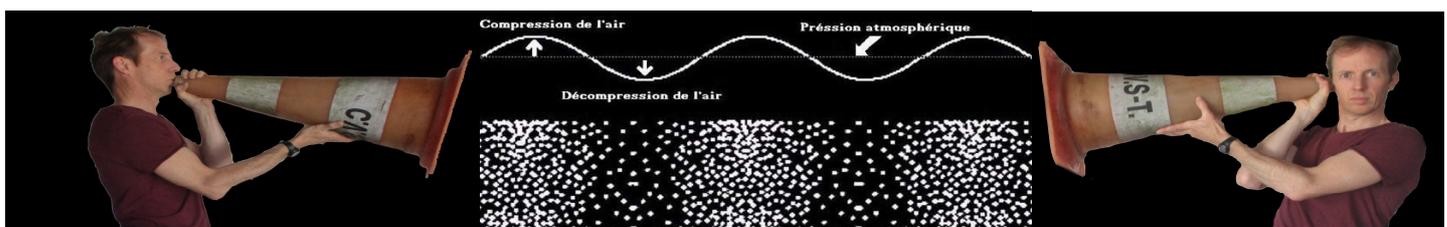
La musique et les mathématiques sont deux langages universels. Les Grecs anciens les ont dotés d'une origine commune puisque la théorie pythagoricienne des proportions avait pour but de percer les secrets de l'harmonie musicale. Depuis, les évolutions de la musique et des mathématiques se sont enrichies mutuellement.

### 3-Le son, une information à coder

Le son, vibration de l'air, peut être enregistré sur un support informatique. Les techniques numériques ont mis en évidence un nouveau type de relations entre les sciences et les sons, le processus de numérisation dérivant lui-même de théories mathématiques et informatiques.

### 4- Entendre la musique

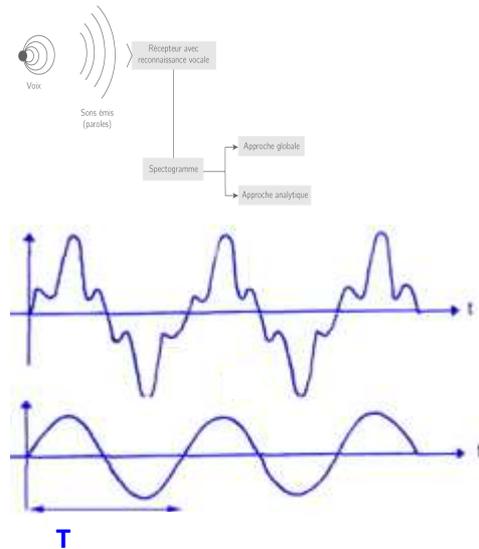
L'air qui vibre n'est musique que parce que notre oreille l'entend et que notre cerveau la perçoit comme telle. Mais l'excès de sons, même s'il est musical, est une forme de perturbation de l'environnement.



# Le son, un phénomène vibratoire

- **ONDE** : phénomène de propagation d'une perturbation sans transport de matière mais avec transport d'énergie.
- **ONDE PERIODIQUE** : L'amplitude du signal émis par l'onde se répète identique à lui-même à intervalle de temps régulier appelé période temporelle T et exprimée en seconde (s)
- Relation entre **période temporelle et fréquence** :  

$$f = \frac{1}{T} \quad f \text{ en Hz et } T \text{ en s}$$
- **Fréquences audibles** : 20 Hz à 20 kHz
- **Son grave** : basse fréquence  
**Son aiguë** : haute fréquence



La **corde vibrante** est le modèle physique permettant de représenter les mouvements d'oscillation d'un fil tendu : on modélise ainsi un instrument de musique à corde ou à vent.

Pour une corde tenue aux deux extrémités :

- plus la corde est légère , plus la fréquence est élevée ( les cordes aiguës d'un instrument sont plus fines).
- plus la corde est tendue, plus la fréquence de vibration est élevée (la note s'élève lorsqu'on tend la corde).
- plus la corde est longue, plus la fréquence est basse (et donc pour un instrument plus le son est grave).

Quatre grandeurs physiques interviennent dans le phénomène de vibration de la corde :

- $f$  (fréquence) en  $s^{-1}$
- $\mu$  (masse linéique) en  $kg \cdot m^{-1}$
- $T$  (tension mécanique) en  $kg \cdot m \cdot s^{-2}$
- $L$  (longueur) en m.
- $c$  (vitesse du son) en  $m \cdot s^{-1}$

$$f = \frac{\alpha}{L} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

$g(x) = \cos(k \cdot x)$   $k$  est le nombre d'onde  $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c}$  connaissant la longueur  $x$  du tube ou de la corde, on peut déterminer la fréquence  $f$  du son émis.

	Colonne d'air fermée aux 2 extrémités	Colonne d'air ouverte à 1 extrémité
Mode fondamental $f$ : $L = \frac{\lambda}{4}$		
Harmonique rang 2 $2L = \frac{3\lambda}{4}$		
Harmonique rang 3		

## La musique ou l'art de faire entendre les nombres

L'oreille humaine « normale » perçoit les sons compris entre 20 Hz et 20 000 Hz avec un pic de sensibilité à 3000 Hz. Le niveau sonore de l'oreille humaine est compris entre 0 dB et 120 dB.

- **L'intensité sonore** est liée à l'amplitude de la vibration sonore perçue et dépend de la puissance transmise

Soit  $I$  l'intensité sonore et  $P$  la puissance acoustique transférée à travers la surface d'aire  $S$  :

$$I = \frac{P}{S}$$

$I$  s'exprime donc en  $W.m^{-2}$   
 $P$  s'exprime en Watt (W)

Deux valeurs références :

le seuil d'audibilité est fixé à  $I_0 = 10^{-12} W.m^{-2}$

le seuil de douleur est atteint pour  $I = 25 W.m^{-2}$

- Niveau sonore : grandeur liée à la sensibilité de l'oreille est définie par :

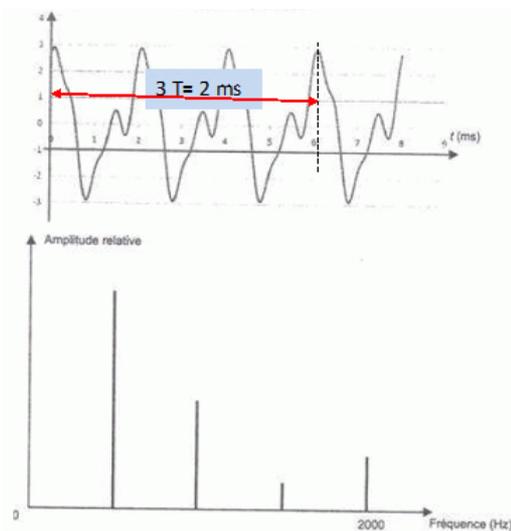
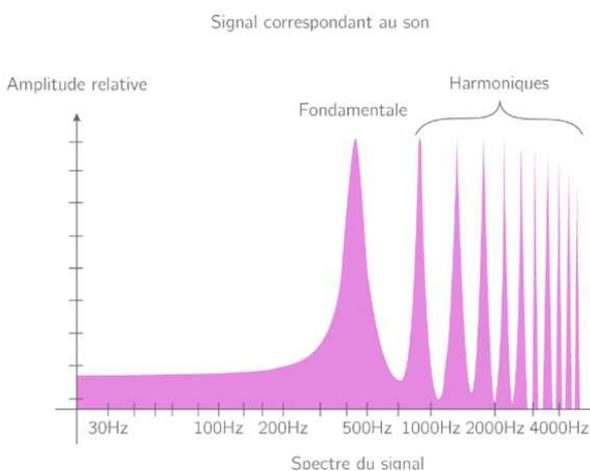
$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

$L$  : niveau sonore en décibel acoustique (dBA)  
 $I$  : intensité sonore du son perçu en Watt par mètre carré ( $W.m^{-2}$ )

- La **hauteur d'un son** dépend de la fréquence du fondamental de celui-ci. Plus la fréquence du fondamental est grande, plus le son perçu est haut (aigu).
- La perception auditive d'une note est caractérisée par son **timbre** qui correspond au **spectre des harmoniques** : la richesse des différents harmoniques dans ce spectre change la perception.

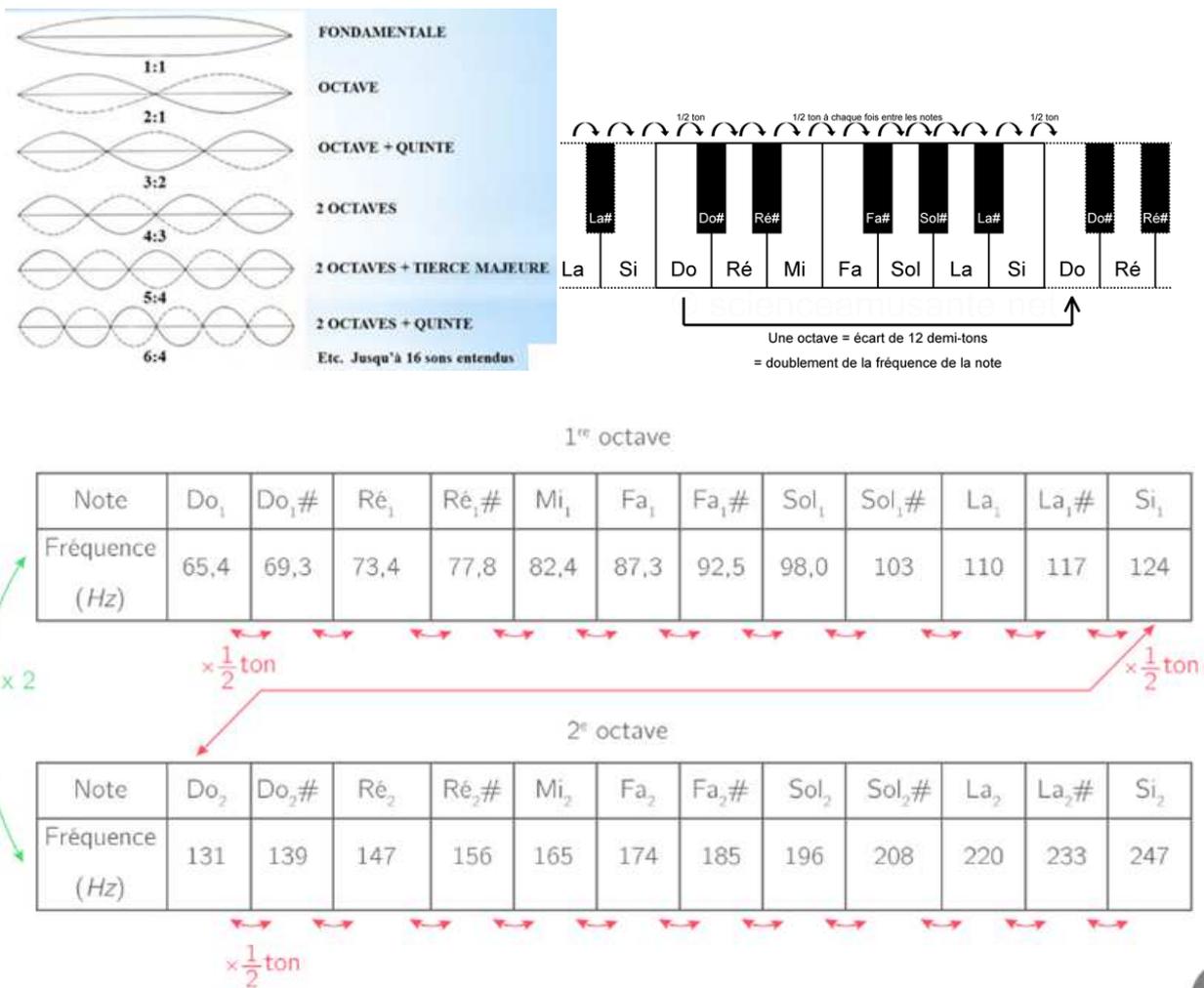
Mais le timbre est aussi déterminée par les transitoires d'attaque et d'extinction de la note, c'est à dire la manière dont l'intensité sonore de la note s'établit et disparaît lorsque l'instrument joue la note. L'enveloppe du son nous permet de « visualiser » les transitoires d'attaque et d'extinction, ainsi que le corps du son :

- L'attaque du son : il s'agit de la montée en amplitude de la vibration sonore au début de l'émission.
- L'extinction du son : il s'agit de la phase pendant laquelle l'amplitude de la vibration diminue avant de s'annuler, à la fin de l'émission.
- Le corps du son : c'est la phase entre l'attaque du son et son extinction



## Octave et gamme tempérée :

- L'**intervalle** entre deux notes (ou deux sons) est le rapport de leurs fréquences : la fréquence la plus grande (plus aigu) par la fréquence la plus faible (plus grave).
- Une **quinte** est un intervalle entre 2 fréquences de rapport  $3/2$  : c'est la gamme Pythagoricienne (exemple de quinte juste : do-sol). On dit que les sons sont consonants s'ils vérifient ce rapport.
- Les **battements** : l'intervalle entre deux notes de la gamme n'est pas constant, ce qui entraîne des battements lorsque les deux sons sont émis. On parle de **dissonance**.  
La note fondamentale la à 440 Hz a une quinte supérieure pure mi à 660 Hz : le son est pur.  
La quinte de tempérament usuel est de 659,3 Hz : cette quinte va émettre presque un battement par seconde. Les battements doublent à chaque octave.
- La **gamme tempérée** basée sur les intervalles réguliers nécessite une fréquence de référence. Par convention, il s'agit de la fréquence du La3 égale à 440 Hz.
- Une **octave** correspond à un intervalle égal à 2.  
La gamme tempérée divise l'**octave** en 12 intervalles égaux, appelés **demi-ton**, de valeur  $2^{1/12}$ .



## Le son, une information à coder

Un **signal analogique** est une fonction continue du temps.

Il a l'inconvénient d'être sensible à toute perturbation électromagnétique.

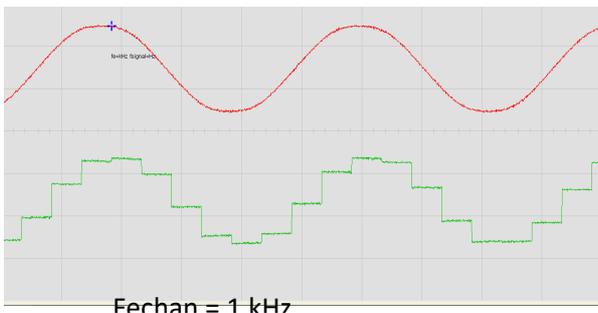
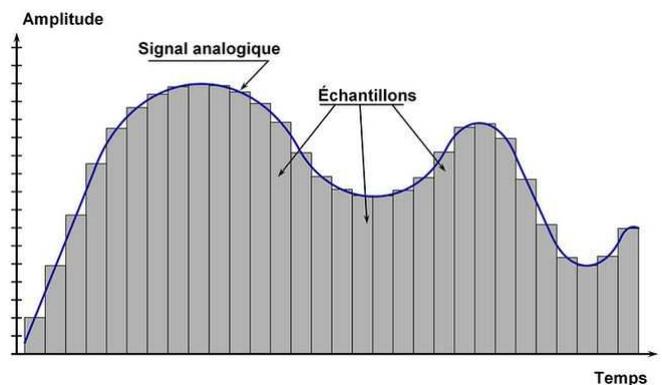
Un **signal numérique** est une succession de 0 et 1 appelés bits (binary digit)

Le traitement numérique des signaux se fera donc sur des **valeurs discrètes**.

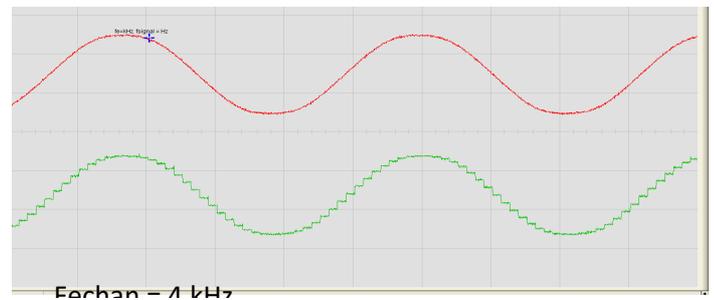
### ÉCHANTILLONNAGE

C'est découper le signal électrique analogique à intervalle de temps régulier  $T_e$  (en s) appelé période d'échantillonnage.

La fréquence d'échantillonnage  $f_e$  (en Hz) définie par  $f_e = 1/T_e$  correspond au nombre de points retenus par seconde sur le signal analogique.



Echantillonnage de qualité moyenne



Echantillonnage de bonne qualité

**Plus la fréquence utilisée sera grande, plus les mesures seront fidèles au signal original.**

### THEOREME DE SHANON

La fréquence d'échantillonnage doit être au moins le double de la fréquence du signal

$$F_{ech} > 2 \times F_{max}$$

## QUANTIFICATION

Approximer toutes les valeurs prises par la tension du signal par un ensemble limité de valeurs.

Associer à chaque valeur de la tension retenue après échantillonnage un nombre binaire constitué de 0 et de 1.

Un bit (Binary digiT) ne peut prendre que 2 valeurs : 0 ou 1.

La quantité de nombres binaires possibles est appelée **résolution R** :  $R = 2^k$  où k est le nombre de bits utilisés.

Le signal numérique est l'ensemble des nombres binaires (comportant une quantité identiques de bits) quantifiant chaque valeur retenue par l'échantillonnage.

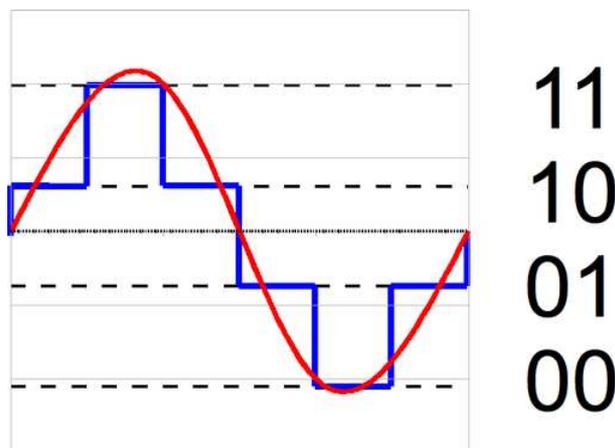
Les processeurs équipant les ordinateurs traitent les bits par paquets multiples de 8 (8, 16, 32, 64 ....) . Un paquet de 8 bits est un **octet**.

**Plus le nombre de bits N est grand et plus l'erreur de quantification est faible.**

Valeur de q : pas ou plus petite valeur de la conversion analogique → numérique.

Valeur de q avec U = 10 V pour quelques valeurs de N :

N	8	10	12	14
nombre de niveaux	256	1024	4096	16 384
q	39 mV	9.77 mV	2.44 mV	0.61 mV

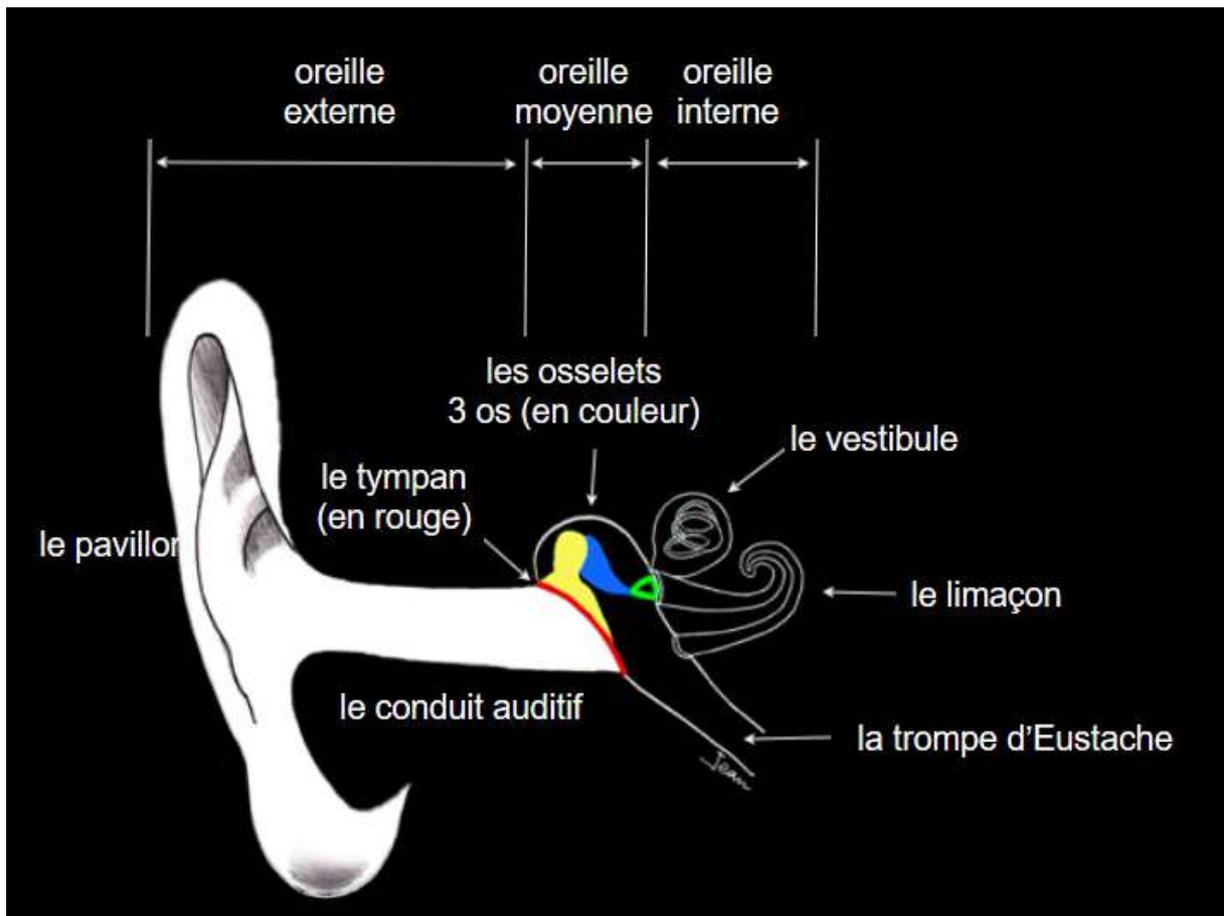


## COMPRESSION

La compression consiste à diminuer 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.

# Entendre la musique



L'oreille externe canalise les sons du milieu extérieur vers le tympan. Cette membrane vibrante transmet ces vibrations jusqu'à l'oreille interne par l'intermédiaire de l'oreille moyenne.

L'être humain peut percevoir des sons de niveaux d'intensité approximativement compris entre **0 et 120 dB**.

Les sons audibles par les humains ont des fréquences comprises entre **20 et 20 000 Hz**.

Le labyrinthe osseux : cavités creusées dans le rocher (os pétreux) et le labyrinthe membraneux.

On retrouve la cochlée et la membrane basilaire et les cellules ciliées :elles entrent en résonance les vibrations transmises au travers de l'oreille médiane. Ce sont les **cellules ciliées qui font la transduction mécanoélectrique** : elles transforment un mouvement de leurs cils en signal nerveux, transmis par le nerf auditif au cerveau qui l'interprète comme un son de la hauteur tonale correspondant à la cellule excitée.

Ces cellules ciliées sont fragiles et facilement endommagées par des sons trop intenses. Les dégâts sont irréversibles et peuvent causer la surdit e.