

La Physique de l'Art

Autour du son ...



Université
Lille1
Sciences et Technologies

Le son dans les programmes

Encart BO n° 32 du 28 août 2008 : organisation de l'enseignement de l'histoire des arts à l'école, au collège et au lycée

- 6 grands domaines artistiques dont les « arts du son »

Tableau et suggestions pour l'Histoire de l'art au collège par B. Legris, académie de Versailles (8 octobre 2009)

- La musique et les arts du son sont traités en éducation musicale

Terminale S

- Observer : ondes et matière
- Spécialité de PC : thème 2 : son et musique

Ce qui va être (entre)vu

Qu'est ce que le son ?

- **Acoustique physique**
 - Caractéristiques ; Grandeurs et phénomènes physiques
- **Acoustique physiologique**
 - Ouïe ; Parole
- **Acoustique psychologique**
 - Comment quantifier la sensation auditive ? Son pur - son complexe

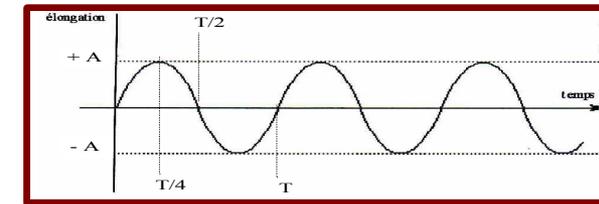
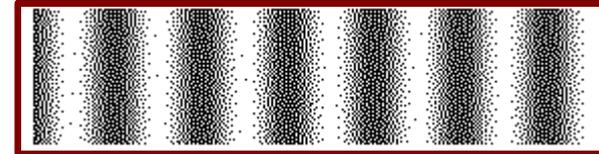
Applications

- **Acoustique des instruments de musique**
 - résonance
- **Acoustique des salles**
 - Interaction son - matière

Qu'est ce que le son ?

Transmission d'énergie émise par un corps en vibration

Onde de pression provoquée dans un milieu élastique et s'y propageant



Variation sinusoïdale de la pression de l'air

- A amplitude, entre 20 μPa et 200 Pa
- f fréquence (**hauteur**),
entre 20 Hz et 20 kHz = audible
infrason et ultrason
- λ longueur d'onde
- c célérité du son : 340 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans l'air,
1500 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans l'eau,
5000 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans les solides

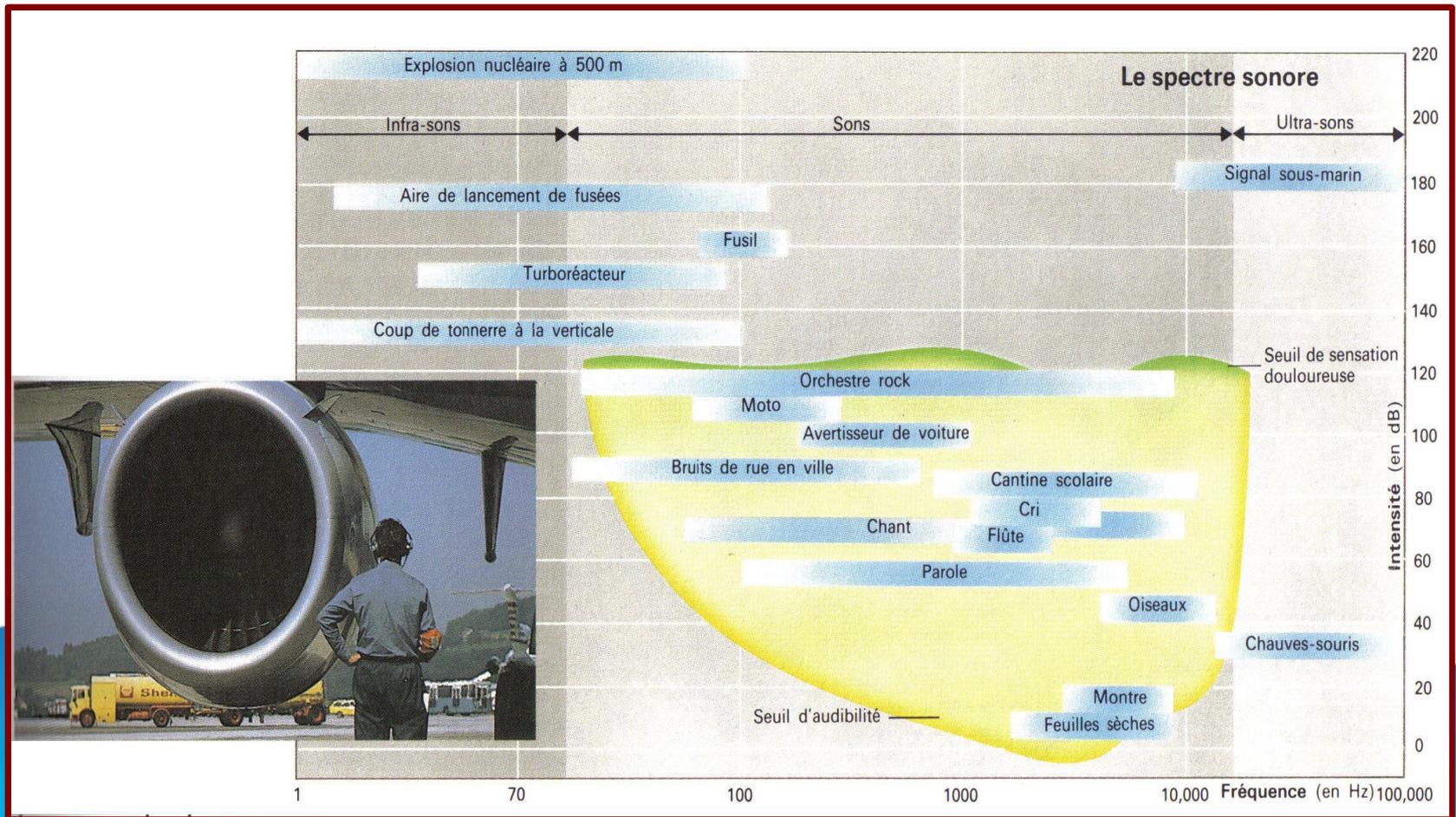
$$p = P - P_0 = A \sin(2\pi f t)$$
$$= A \sin\left(2\pi \frac{c}{\lambda} t\right)$$

$$c = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}}$$
$$= \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \text{ si gaz parfait}$$

Autres propriétés

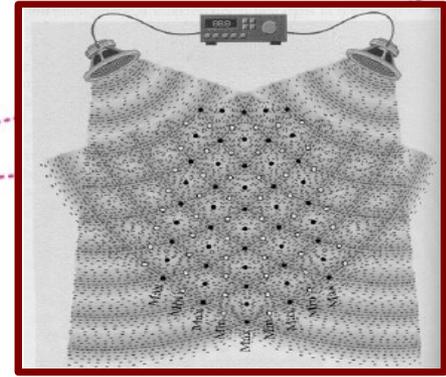
- Intensité acoustique, entre 10^{-12} et 100 W.m^{-2}
- f : 3 ordres de grandeurs ; p : 7 ; I : 14

$$I_{dB} = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} = 20 \log_{10} \frac{\text{amplitude}}{\text{amplitude standard}}$$

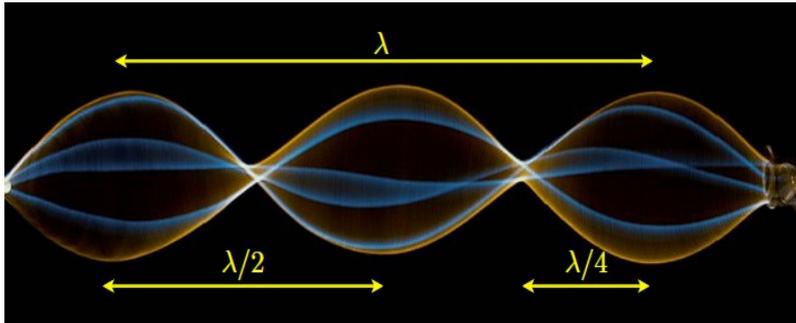


Superposition des sons de même fréquence

- 2 ondes de sens quelconques et se croisant :
→ interférences



- 2 ondes se propageant en sens opposés : → ondes stationnaires



Ventres : mouvement maximal $x = n \frac{\lambda}{2}$

Nœuds : pas de mouvement $x = (2n+1) \frac{\lambda}{4}$

Résonance

Milieu immobile à ses extrémités (= nœuds)

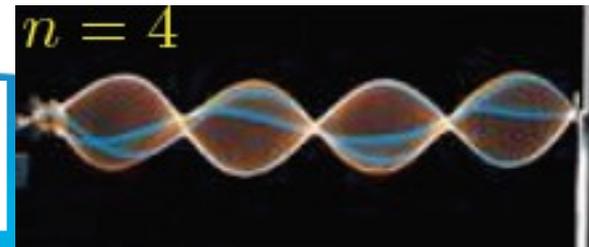
Milieu « ouvert » à ses extrémités (= ventres)

$$L = N \frac{\lambda}{2} \quad f = N \frac{c}{2L}$$



N = 1 : fondamental

N = 2, 3, ... : harmoniques



Résonance acoustique

La plupart des instruments de musique emploient des résonateurs

- **Cordes des violons, guitares, harpes, luths, pianos, ...**
 - fréquences de résonance f_R directement liées à la masse, la longueur et la tension de la corde
 - tension plus élevée et longueur plus courte : f_R augmente
 - excitation en frappant ou pinçant une corde (= impulsion contenant toutes les fréquences) : les fréquences non égales à nf_R sont rapidement atténuées, seules subsistent les vibrations harmoniques que nous entendons comme note musicale
- **Longueur du tube d'une flûte**
 - flûtes à bec : tuyaux cylindriques ouverts
 - clarinettes et cuivres : tuyaux cylindriques fermés (à un côté)
 - saxophones, hautbois, bassons : tuyaux coniques fermés (à un côté)
- **Membrane d'un tambour**

Phonation

La soufflerie :

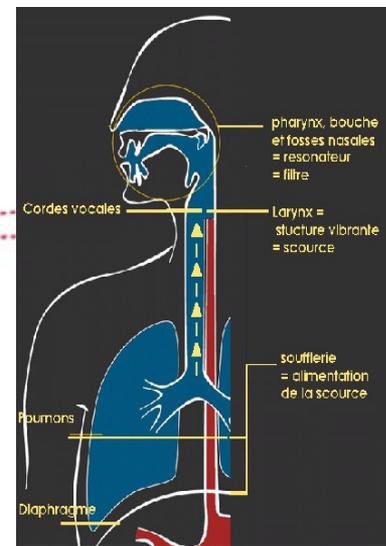
[poumons + diaphragme ... glotte]

Le système vibrateur :

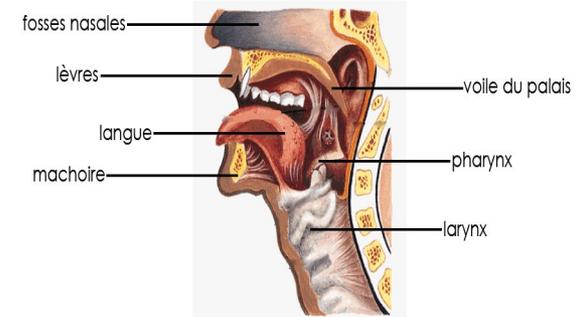
[larynx + cordes vocales]

Les résonateurs :

[pharynx + bouche + nez]

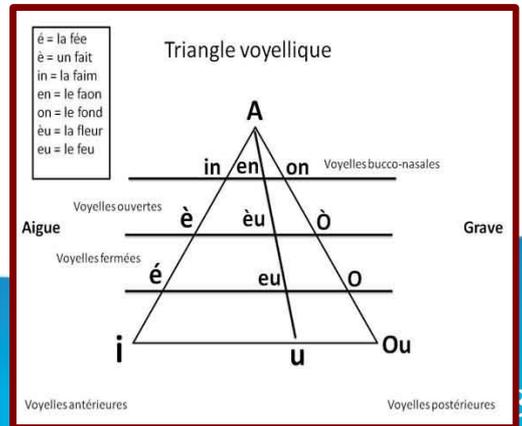


Points de réglages résonantiels :



fondamental

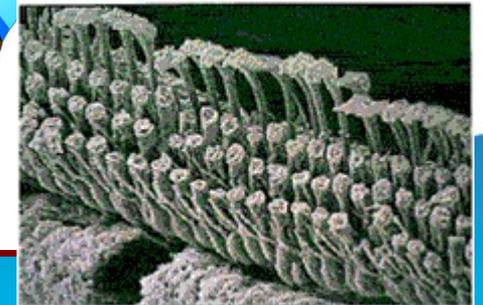
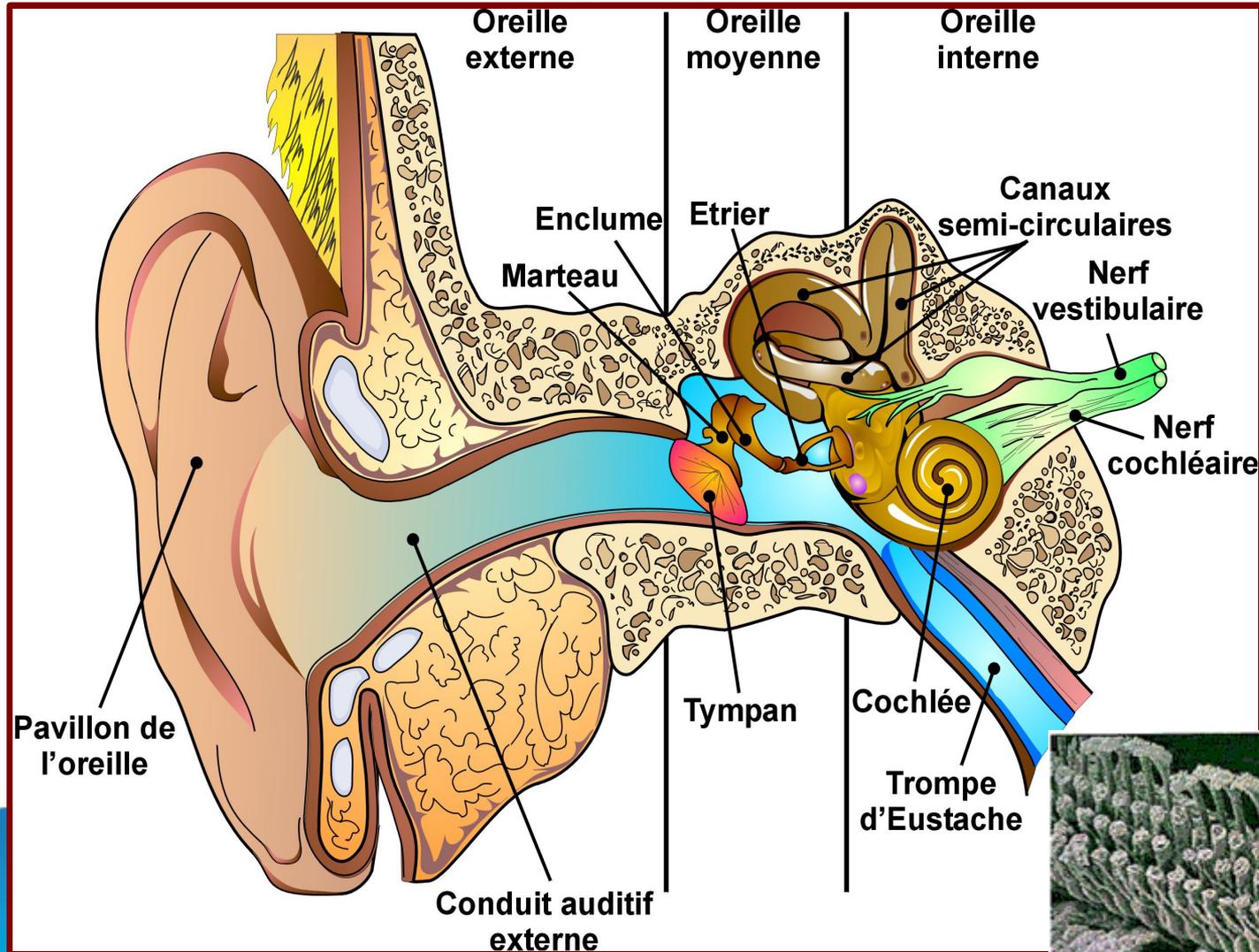
harmoniques



Ouïe

Seuils :

seuil d'audibilité 0 dB 10^{-12} Wm^{-2} ou # $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$
seuil de douleur 130 dB 10 Wm^{-2} ou # 32 Pa



Superposition des sons de fréquences différentes

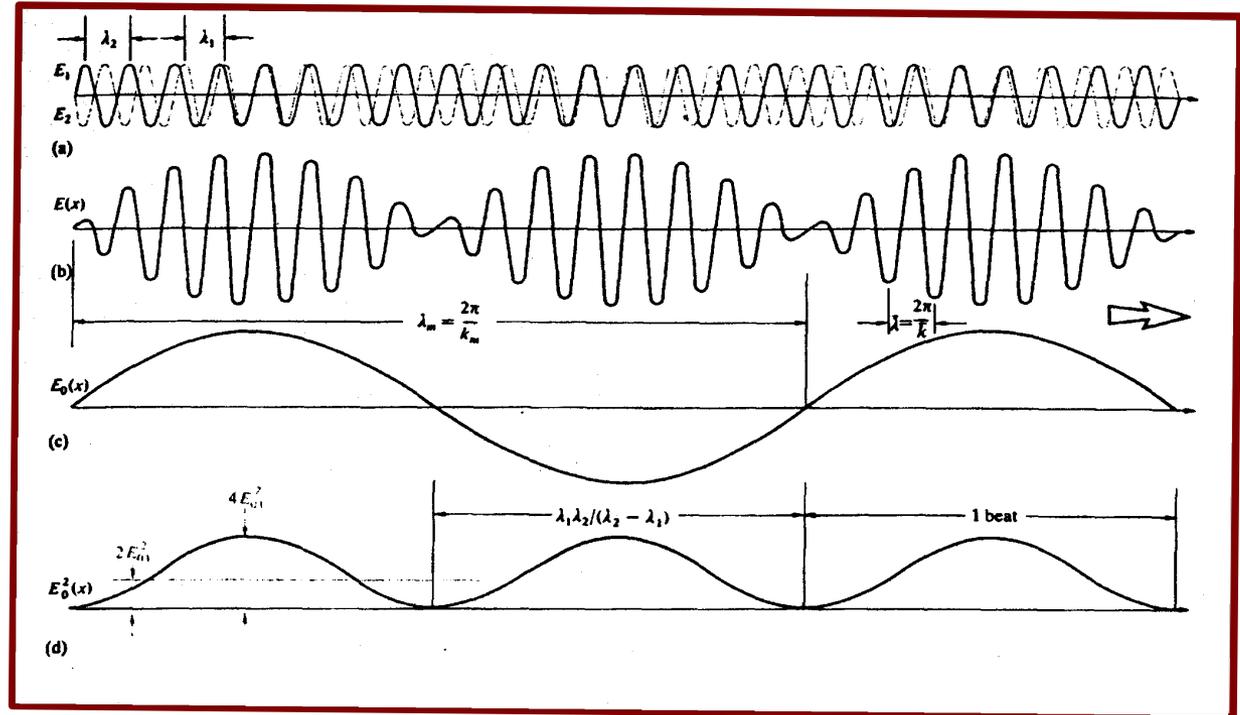
- 2 ondes : battements

Les deux ondes

Leur somme

Leur enveloppe

Intensité



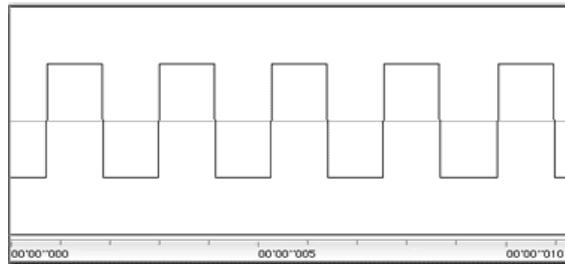
- Application : un instrument est « accordé », lorsqu'il joue exactement le même note que la note de référence, c'est-à-dire lorsque les battements ne sont plus perceptibles

- référence : le *la* d'un hautbois ou d'un diapason ($\Delta f > \text{qq Hz}$)
- accordeurs de pianos

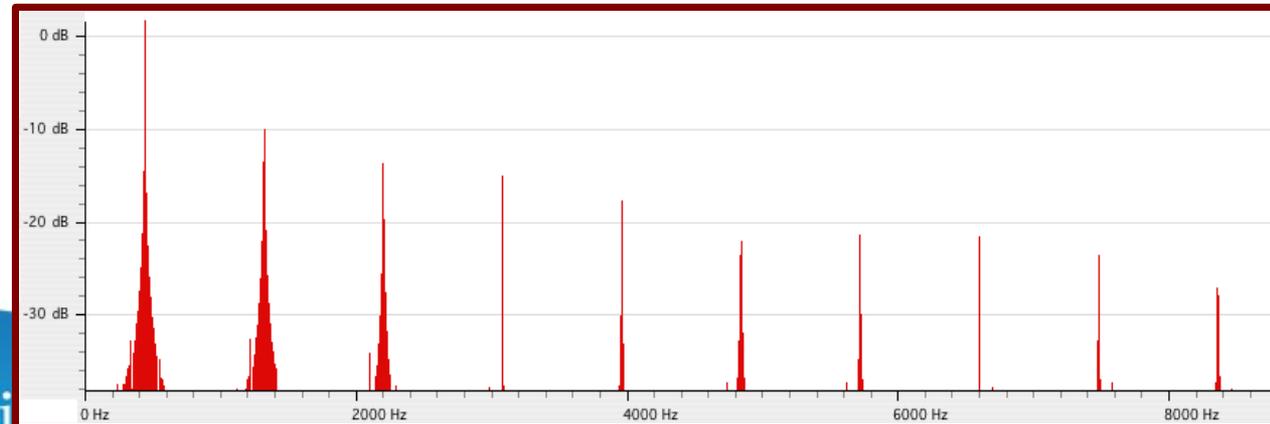
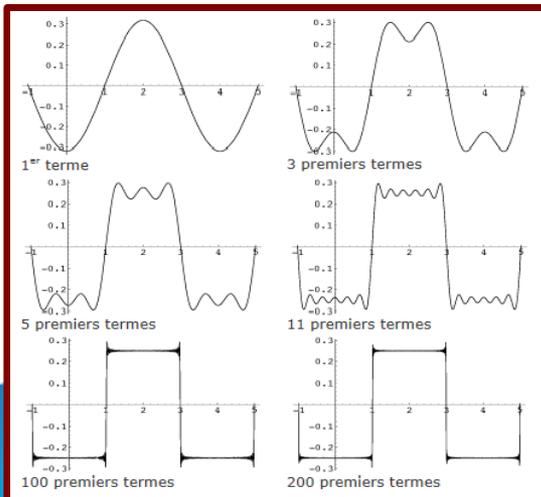
Superposition de plusieurs sons de fréquences différentes

- Théorème de Fourier : tout signal périodique de fréquence f se décompose en une somme de sinusoides de fréquences $f, 2f, 3f, 4f, \dots$, appelées harmoniques.

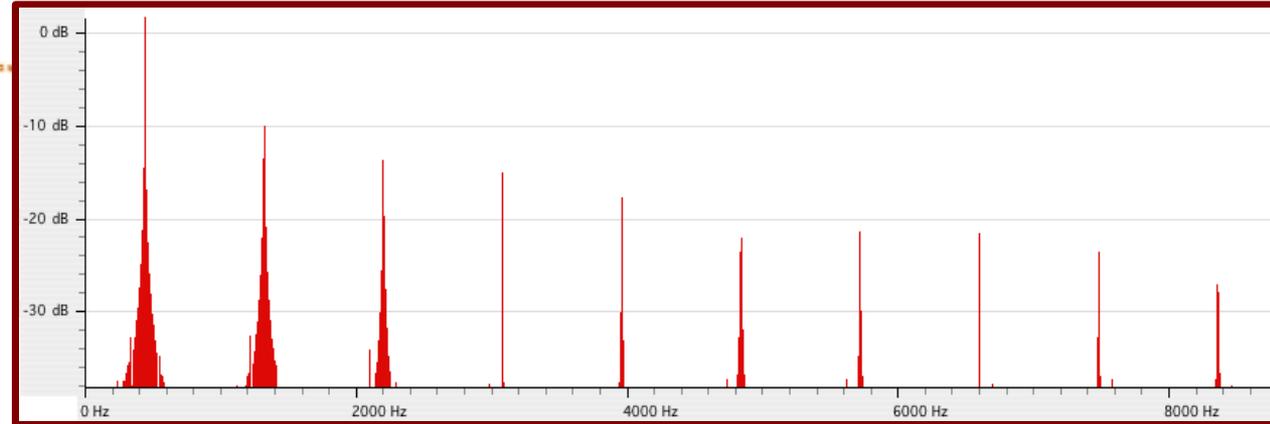
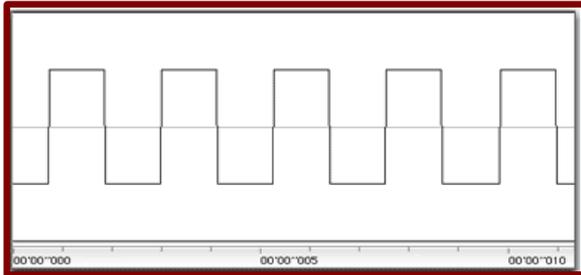
$$F(t) = A_1 \sin(2\pi f t) + A_2 \sin(2\pi 2 f t) + A_3 \sin(2\pi 3 f t) + A_4 \sin(2\pi 4 f t) + \dots$$



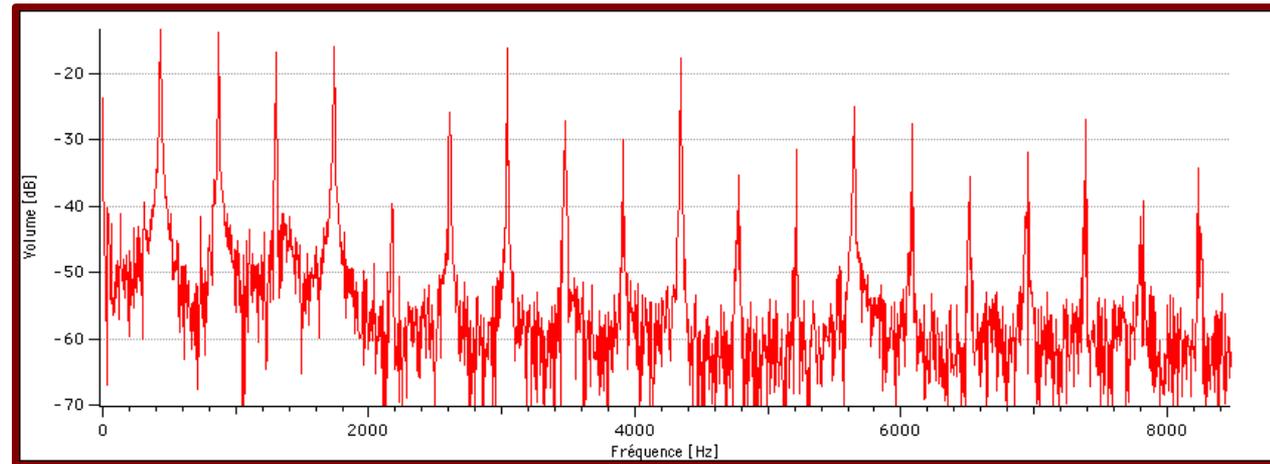
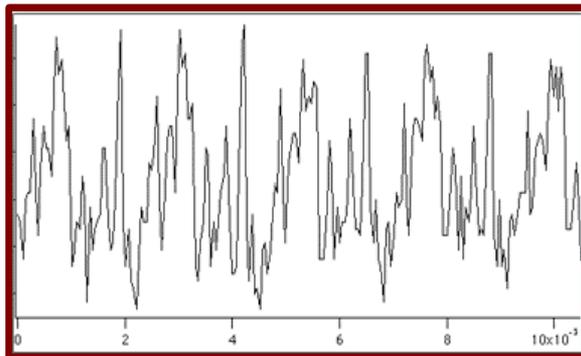
Créneau à 440 Hz



Superposition de plusieurs sons de fréquences différentes : **TIMBRE**

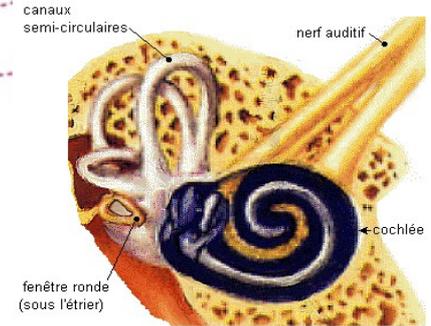


violon à 440 Hz



L'analyseur de Fourier est dans l'oreille interne

- les milliers de cils vibratiles de la cochlée vibrent en résonance avec les différentes composantes fréquentielles du son
- le cerveau enregistre les vibrations des différents cils et mémorise les termes de la série pendant plus ou moins longtemps en fonction de l'intérêt qu'on y porte



Découpage du monde sonore

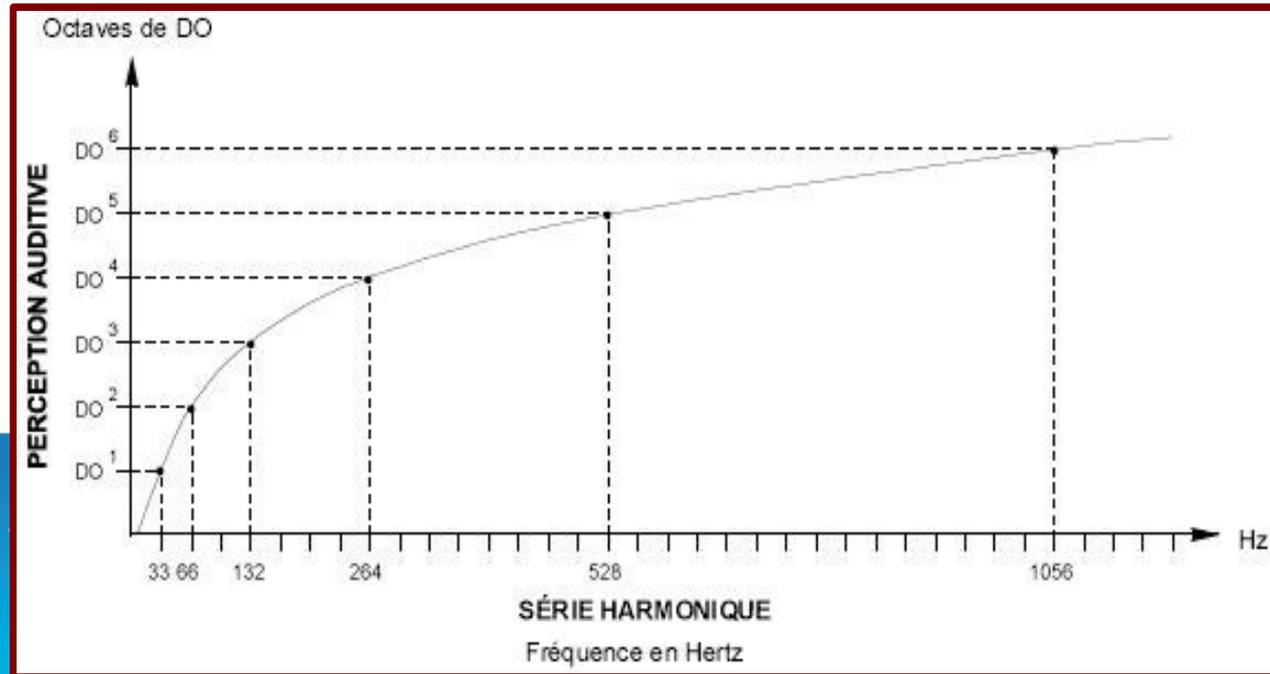
- Lorsque la fréquence est multipliée par 2, le cerveau reconnaît la similitude des termes paires de la série : $A_{2n} \sin(2\pi n f t)$: il donne le même nom au 2^{ème} son en précisant que l'un est plus grave que l'autre

Intervalle $[f, 2f]$

- L'échelle musicale d'une seule octave permet à l'oreille de se repérer dans tout le domaine fréquentiel. Le changement d'octave ne perturbe pas la reconnaissance des notes
- Une harmonie juste est plaisante car la consonance entre 2 sons est d'autant plus forte qu'ils partagent les mêmes harmoniques

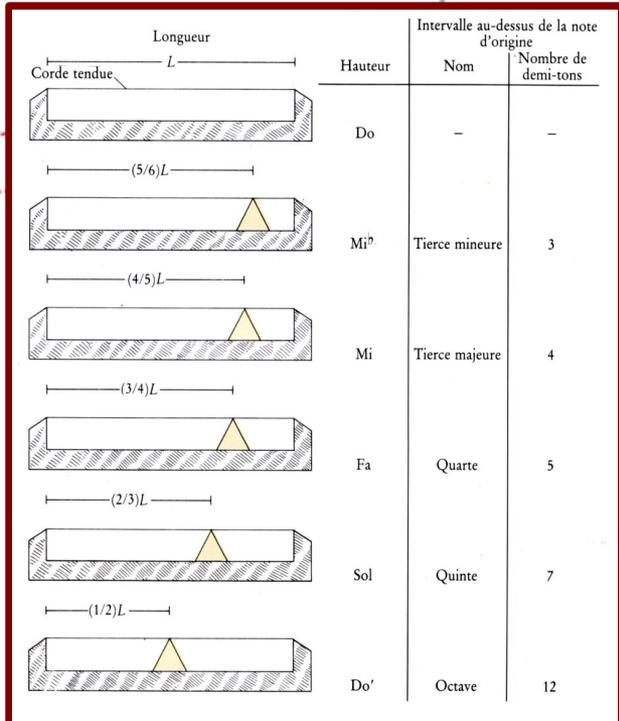
La perception auditive est logarithmique ...

- L'oreille est plus sensible au rapport entre deux fréquences qu'à leur soustraction.
 - Perception du Do 66 Hz et du Do 33 Hz (distance 33 Hz ; rapport 2:1)
 - Perception du Do 528 Hz et du Do 1056 Hz (distance 528 Hz ; rapport 2:1)
- La distance séparant les Do 33 et 66 Hz semble identique à la distance séparant les Do 528 et 1056 Hz, parce que le rapport est le même.

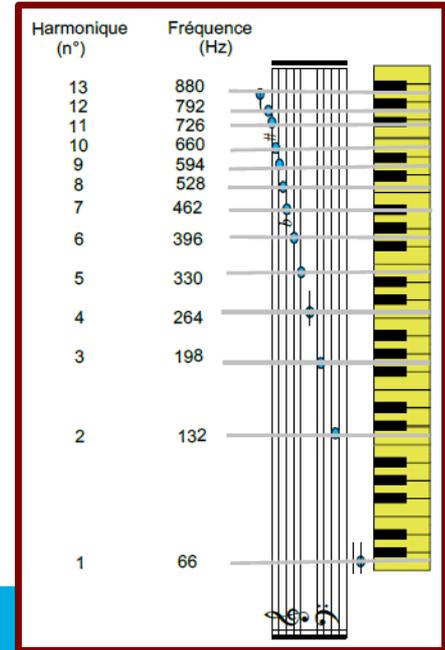


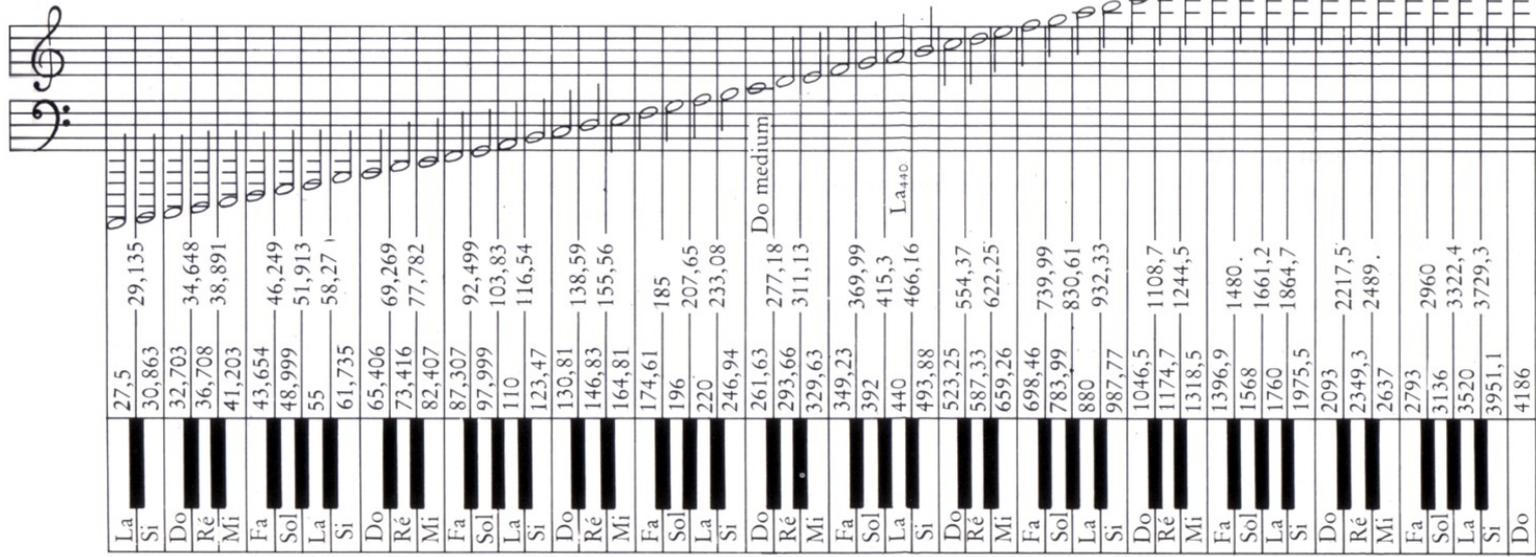
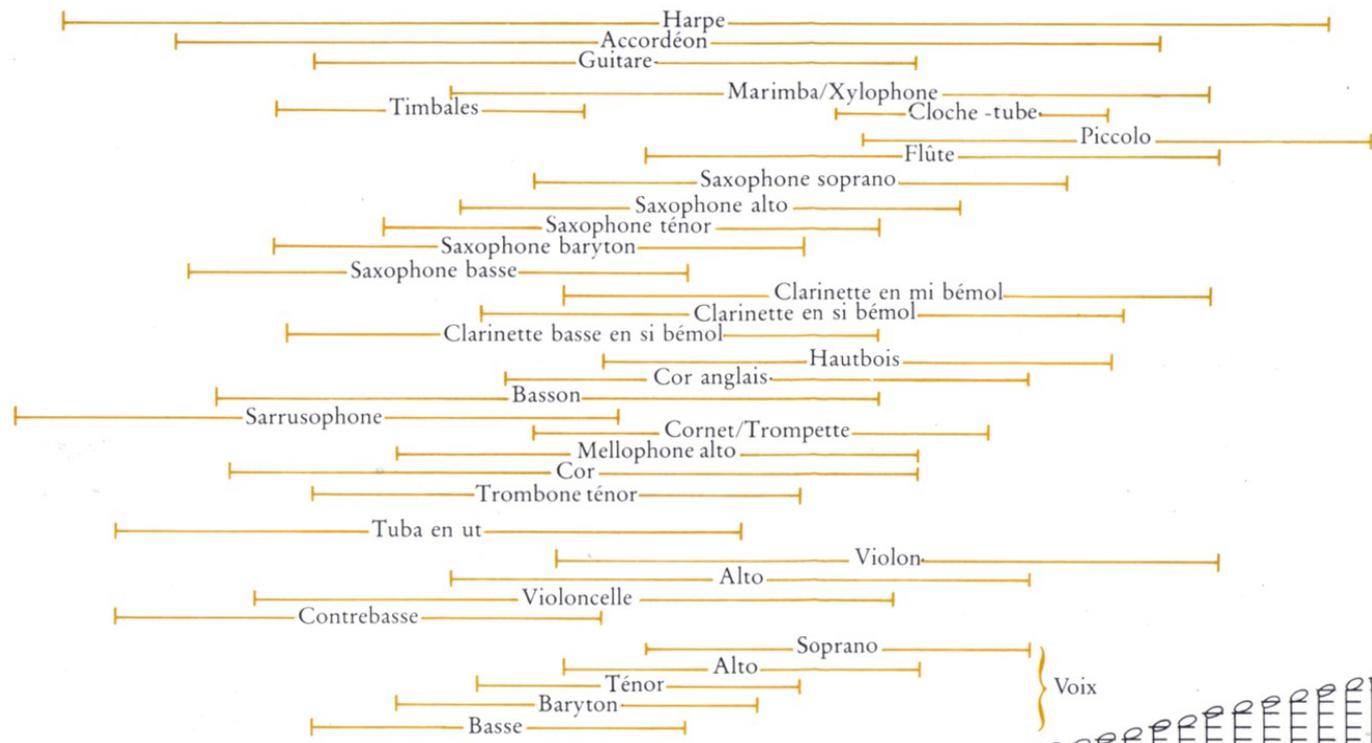
Harmonie = plaisir ...

- Ce n'est pas la valeur numérique d'une fréquence qui compte, c'est **l'intervalle** (= « tons » ou « demi-tons ») entre les notes d'une même octave : si l'intervalle est harmonieux, il est conservé s'il est discordant, il est rejeté.
- 1ère explication scientifique par Pythagore (550 avant J.C.)
 - relation entre les longueurs des cordes et les intervalles musicaux



- 2ème explication musicale par Aristoxène
 - classement des intervalles en fonction du plaisir musical ressenti
 - le plaisir est d'origine physiologique
 - La série d'intervalle correspond exactement à la série de Fourier !

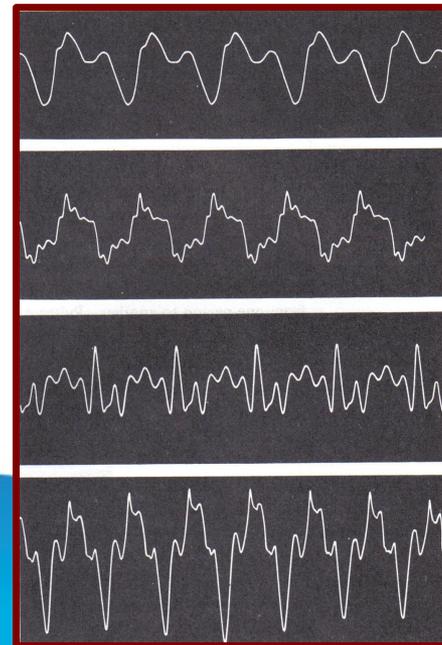
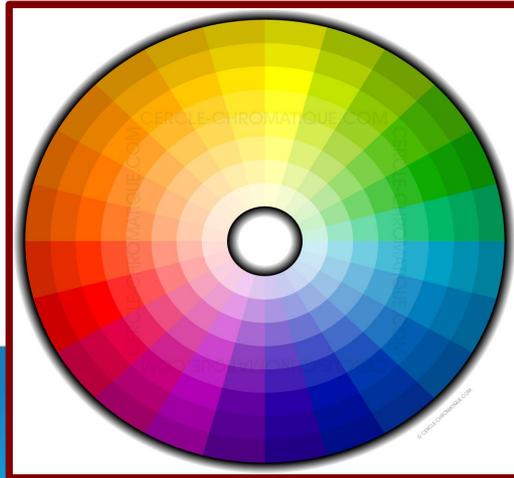




Œil

Oreille

Rétine (3 cônes)	Cochlée (15 000 cellules ciliées)
Sens. = photon unique	Sens. = 2×10^{-5} Pa
4×10^{14} - 8×10^{14} Hz (x 2 - 1 octave)	20 - 20×10^3 Hz (x 1000 - 10 octaves)
Analyse en fréquence (capacité à distinguer des ondes de fréquences voisines)	
Intégrateur	Grande discrimination



flute

clarinette

hautbois

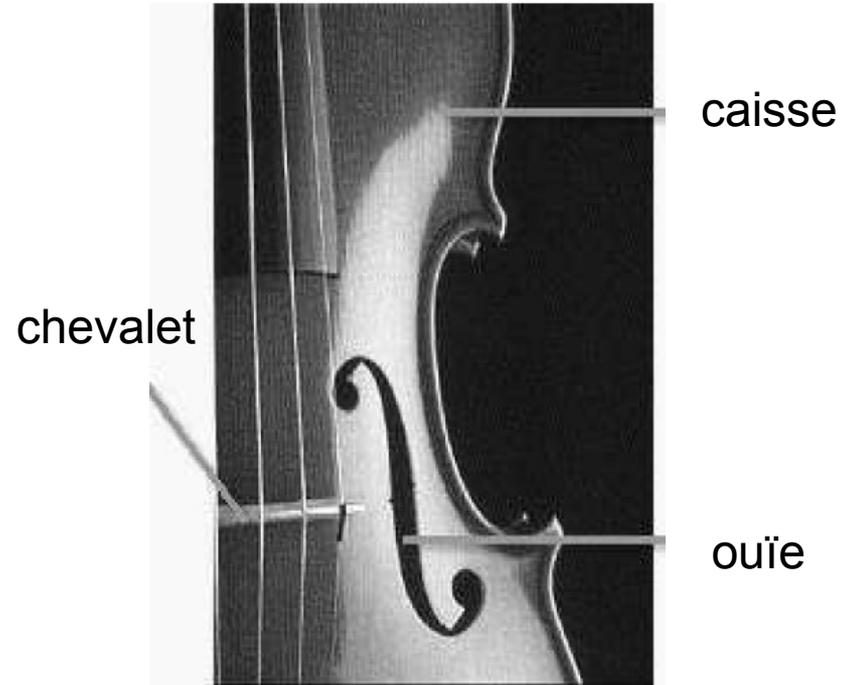
saxophone

Comment le son est-il amplifié ?

Transmission mécanique

- Violon :

- Les vibrations des cordes sont transmises au chevalet qui les transmet à la caisse du violon.
- Les vibrations du bois produisent des variations du volume d'air situé à l'intérieur de la caisse. L'air est successivement aspiré et expulsé par les ouïes
- La qualité du violon vient de la capacité du bois et de l'air de vibrer à l'unisson, en résonance

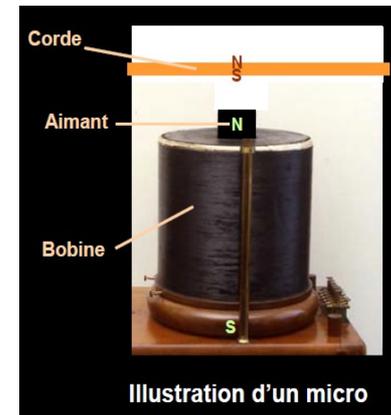


Comment le son est-il amplifié ?

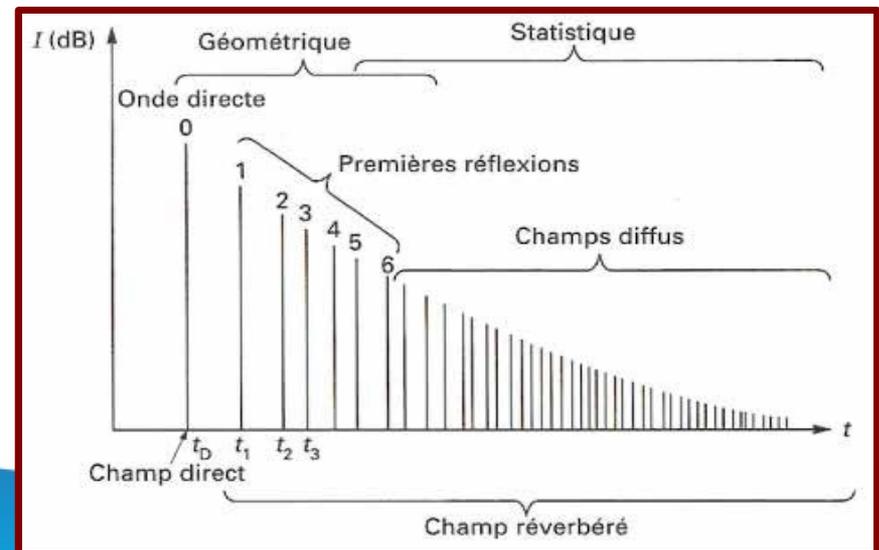
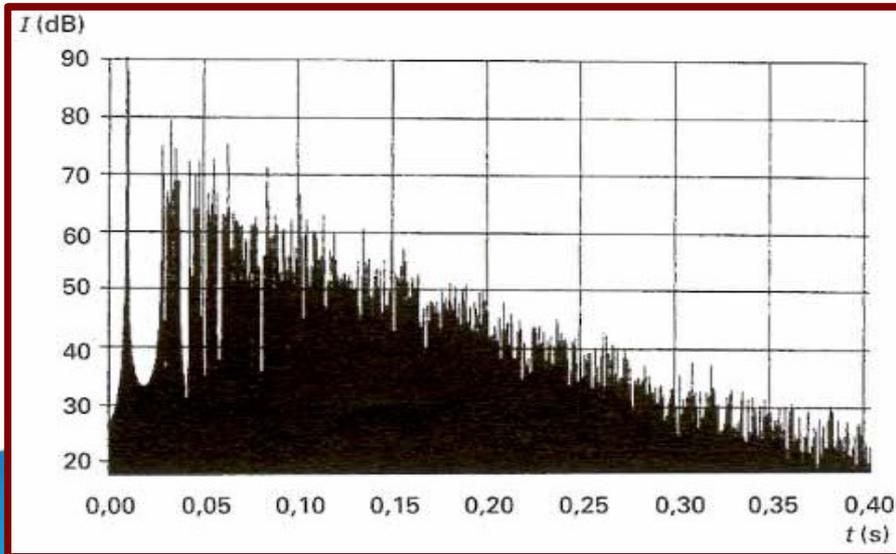
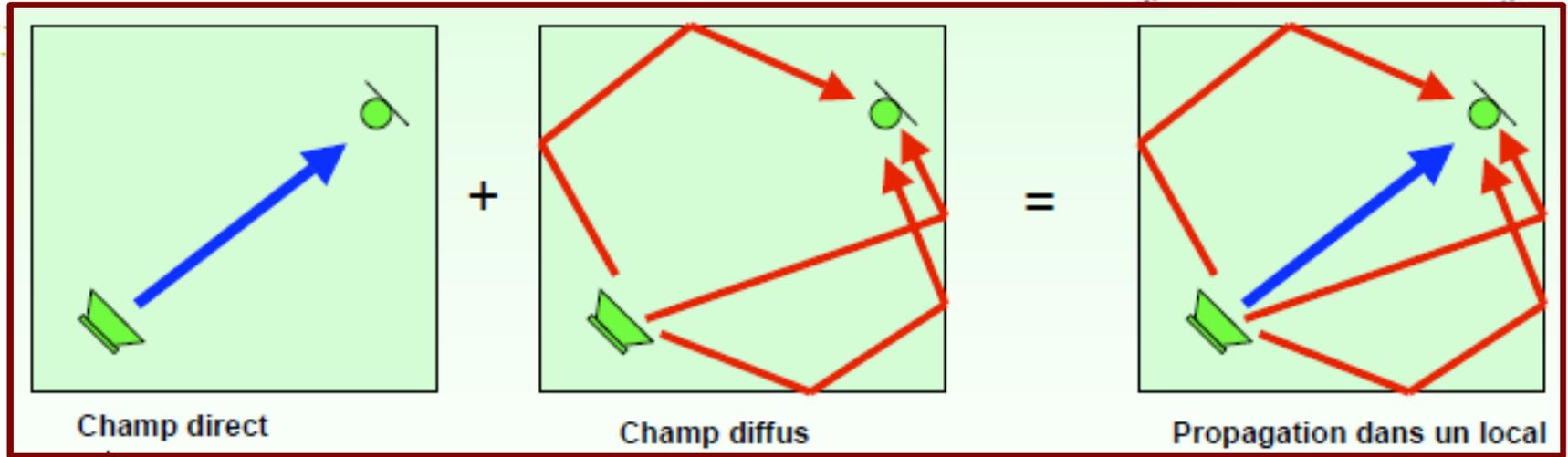
Transmission électronique

- Guitare

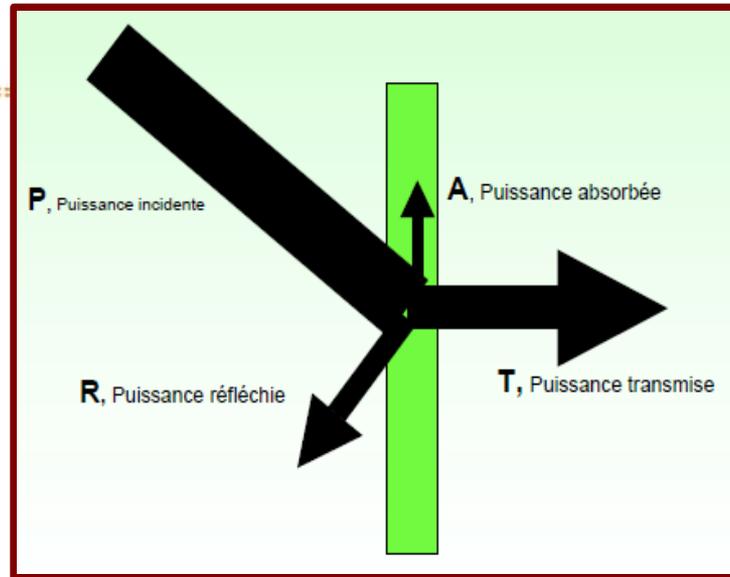
- Micro, simple fil enroulé autour d'un aimant, placé sous chaque corde
- La corde ferromagnétique (Ni-Fe) baigne dans le champ magnétique de l'aimant : en vibrant elle perturbe les lignes de champ et crée une force contre électromotrice au sein de la bobine, se traduisant à ses bornes par une différence de potentiel périodique.
- Cette ddp est amplifiée pour être convertie en puissance électrique transmise à un haut parleur.



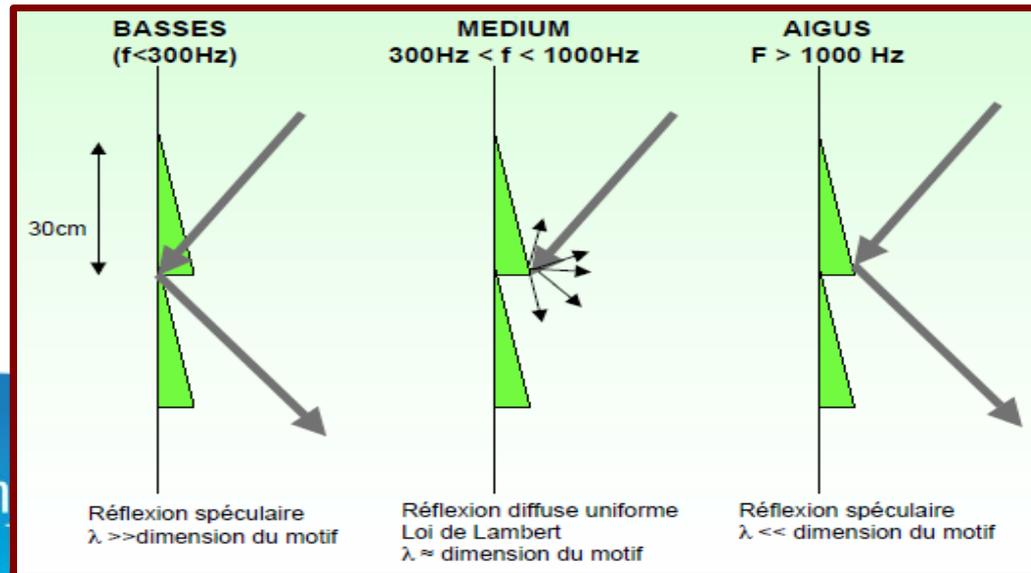
Acoustique architecturale



Acoustique architecturale



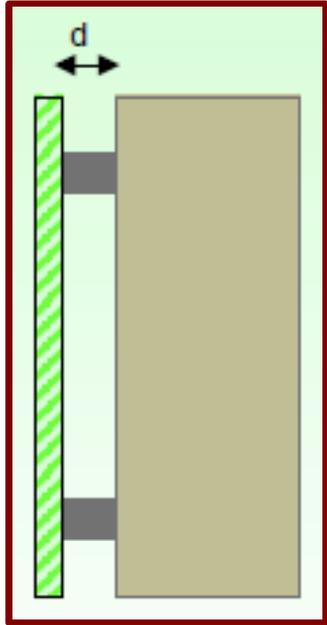
Réflexion



Acoustique architecturale

Absorption

Graves



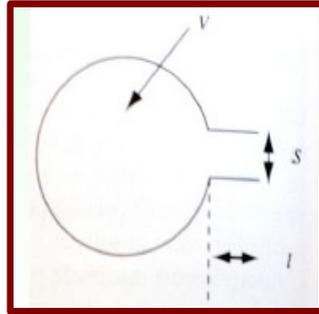
$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{\rho_s d}}$$

Contreplaqué

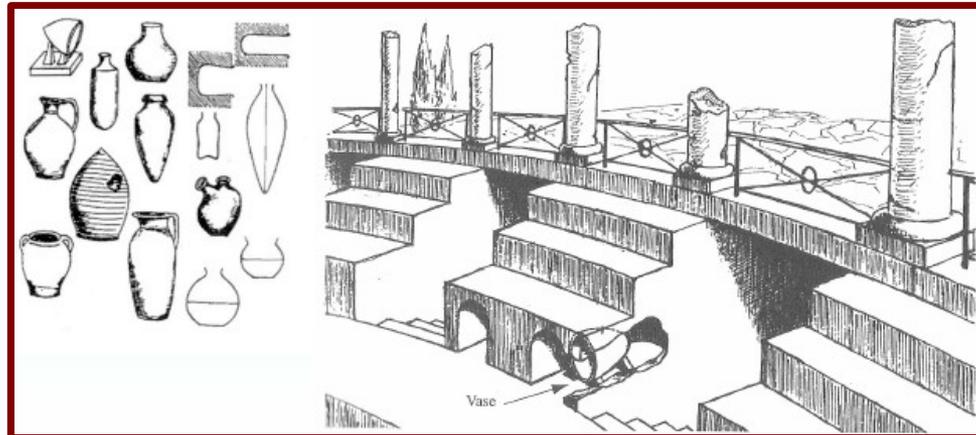
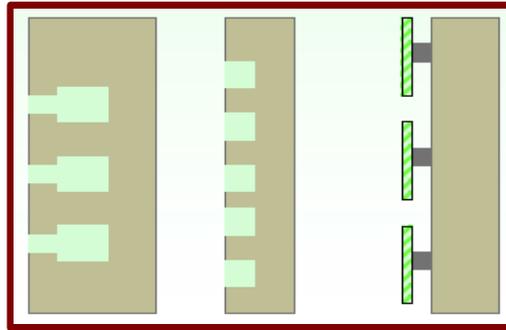
$\rho_s = 5 \text{ kg/m}^2$ $d = 8 \text{ cm}$

$f_0 = 95 \text{ Hz}$

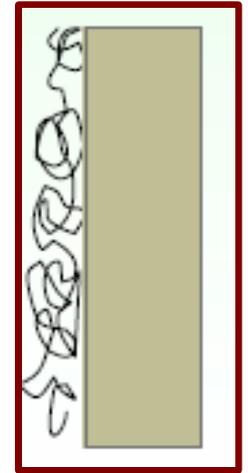
Médiums



$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\gamma \frac{ps}{\rho l V}}$$



Aigus



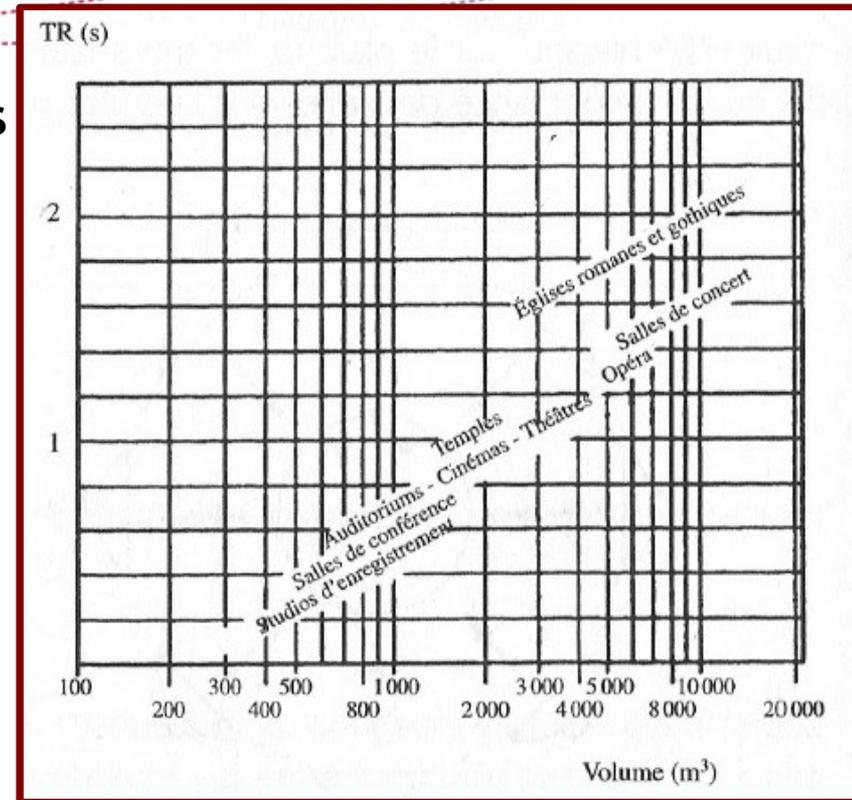
Acoustique architecturale

Temps de réverbération Tr

- Lorsque les sources s'arrêtent, le récepteur peut continuer à capter les ondes réfléchies pendant un certain temps Tr .
- Tr = temps, en secondes, mis par le signal pour décroître de 60 dB (i.e. énergie 1000 fois plus faible) après l'arrêt de la source
 - Formule de Sabine

$$Tr = \frac{0,16V}{\sum \alpha S}$$

- La réflexion est inaudible si elle arrive très rapidement après le son direct et/ou si son niveau est très bas par rapport au son direct (= effet de masque)



Quelques digressions pour finir ...

Musique et astronomie

- Deux sciences liées depuis toujours

- Enseignées dans les universités médiévales (avec la géométrie et l'arithmétique)
- Les astronomes utilisent la musique pour « visualiser » certains phénomènes astrophysiques (pulsations des naines blanches, ...)
- Rayonnement fossile = 1er chant de l'univers

W. Herschel



Brian May
(Queen)

Digressions ...

L'univers est une symphonie ...

- **Théorie des cordes**

- L'univers et toutes les particules qui le composent sont décrits en termes de cordes
- La corde tendue d'un violoncelle peut donner lieu à une multitude sons, selon le pincement qu'on lui applique
- Par analogie, les particules seraient les différentes notes d'une même corde et l'univers tout entier est une symphonie ...

Références

Sites Internet

- **e2phy : <http://e2phy.in2p3.fr/2004/e2phy2004.html>**
 - Conférence de J. Cl. Damien : « De la Physique du son ... à l'Art de s'en servir ! »
 - Conférence de J. Cl. Lerroulley : « Symphonie pour orgue en deux temps et trois mouvements »
- **<http://www.levirtuose.com/index.php?id=1291>**
- **<http://www.cours-chant-paris.fr/actus/comment-fonctionne-voix/>**

Ouvrages

- « **Le son musical** » par John Pierce.
Collection « **Pour la Science** » Belin