

La Physique de l'Art

Autour du son ...

Ce qui va être (entre)vu

- Qu'est-ce que le son ?
 - 1) Acoustique physique (caractérisation, grandeurs et phénomènes)
 - 2) Acoustique physiologique (parole, ouïe)
 - 3) Acoustique psychologique (quantification de la sensation auditive)
- Applications
 - 4) Acoustique des instruments de musique
 - 5) Acoustique des salles (interaction son - matière)

1 – Qu'est-ce qu'une onde ?

– Le son ?

Origine, propriétés, amplification ...

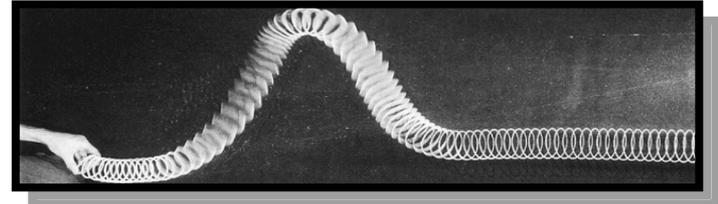
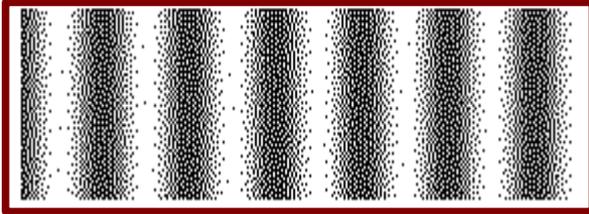
Qu'est ce qu'une onde ?

Transmission d'énergie émise par un corps en vibration

La perturbation est initiée par une source ...

Les oscillateurs ne sont pas isolés du milieu extérieur

La perturbation se transmet de proche en proche



La source impose un certain nombre de caractéristiques aux ondes qu'elle génère :

Structure temporelle de la perturbation

Type de déformation du milieu

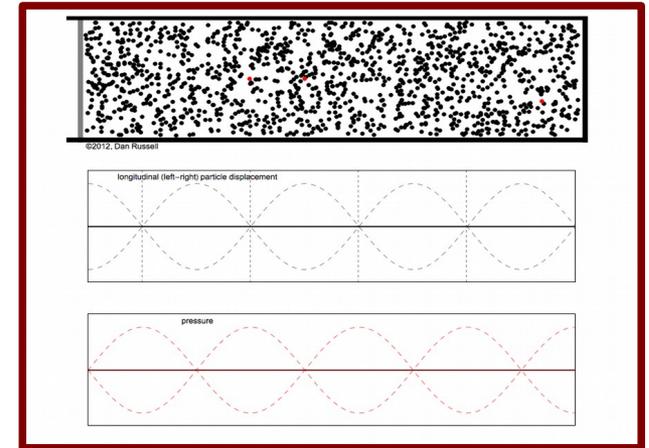
... la propagation est conditionnée par le milieu

Les propriétés mises en jeu dépendent en général du type d'onde considéré

Le milieu, par ses propriétés relatives au type de déformation qui lui est imposé, détermine la vitesse de propagation du phénomène

Qu'est ce que le son ?

Son : onde de pression provoquée dans un milieu élastique et s'y propageant.



Variation sinusoïdale de la pression de l'air

- A amplitude, entre $20 \mu\text{Pa}$ 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

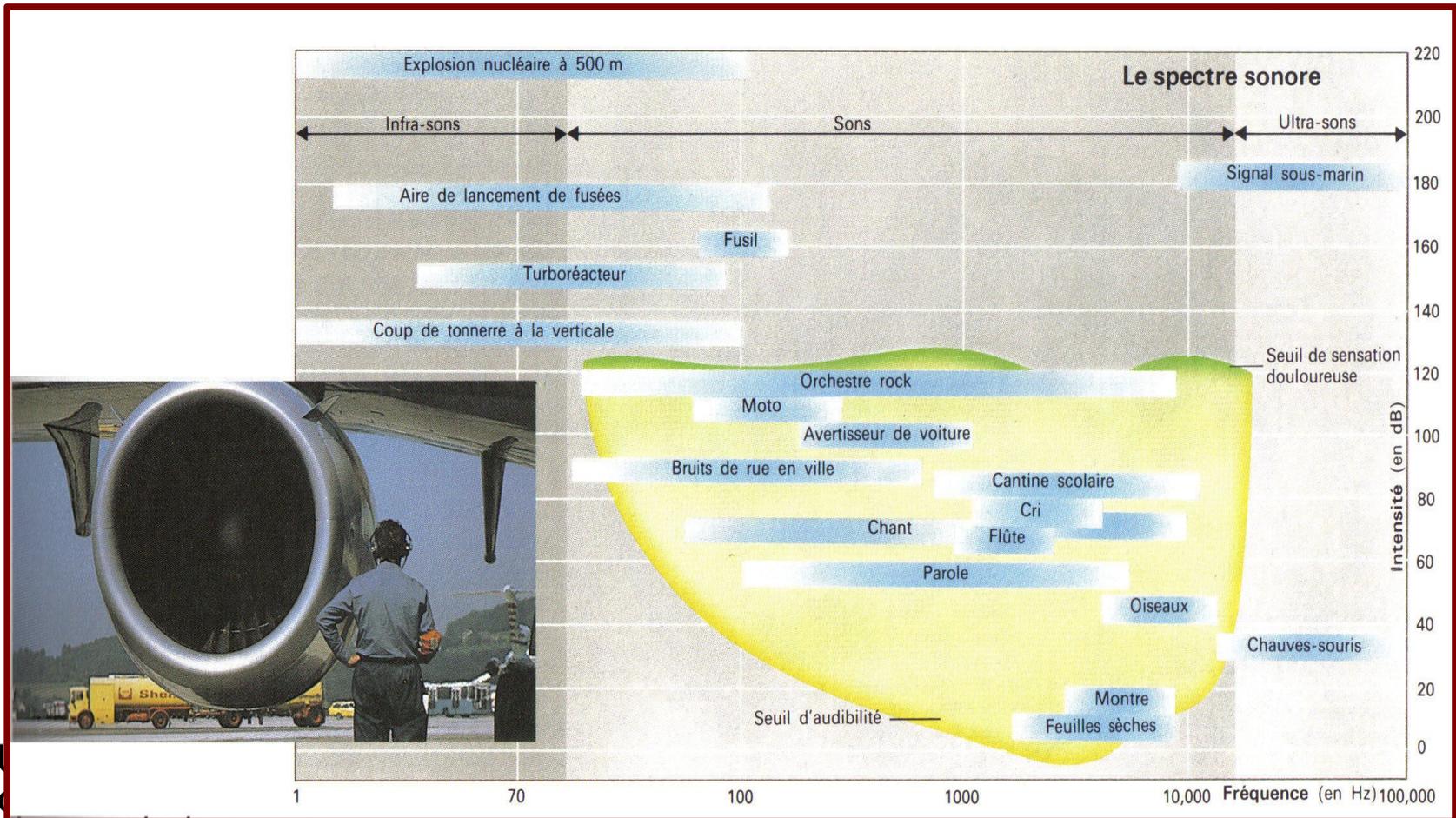
$$p = P - P_0 = A \sin(2\pi f t) \\ = A \sin\left(2\pi \frac{c}{\lambda} t\right)$$

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

Perception sonore

- Fréquence, entre 20 et $2 \cdot 10^4$ Hz, soit 3 ordres de grandeurs
- Pression acoustique (= surpression), entre $2 \cdot 10^{-5}$ et 200 Pa, soit 7 ordg
- Intensité acoustique, entre $I_0 = 10^{-12}$ et 140 W.m^{-2} , soit 14 ordg

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



Perception sonore

<http://www.pass-santejeunes-bourgogne-franche-comte.org/16-18-ans/bruit-musique-audition/>

Lorsque tu te trouves à 1 mètre d'une autre personne :

- Si tu peux avoir une conversation normale, le niveau sonore qui t'entoure est inférieur à 70 dB
- Si tu dois accentuer la voix, le niveau sonore est supérieur à 80 dB
- S'il faut que tu cries pour te faire comprendre, le niveau sonore est supérieur à 90 dB
- Si toute compréhension est impossible, le niveau sonore est supérieur à 105 dB



DURÉE D'EXPOSITION MAXIMALE SELON LES BRUITS...

Le véritable danger n'est pas uniquement dans le volume sonore : il se situe aussi dans la **dose de son**, c'est-à-dire le temps d'exposition à un volume sonore donné.



QU'EST-CE QUE TU RISQUES ?

AUDITION NORMALE

Perte moyenne inférieure à 20 dB, aucune gêne.



DÉFICIENCE LÉGÈRE

Perte moyenne de 20 à 40 dB.
Perte des bruits faibles, des aigus et de certains éléments phonétiques.



DÉFICIENCE MOYENNE

Perte moyenne de 40 à 70 dB.
Seule la parole forte est perçue.



SURDITÉ

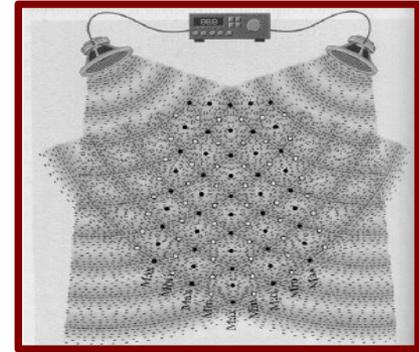
Perte moyenne de 70 à 120 dB et plus.



Amplifier un son : C'est superposer des ondes de même fréquence

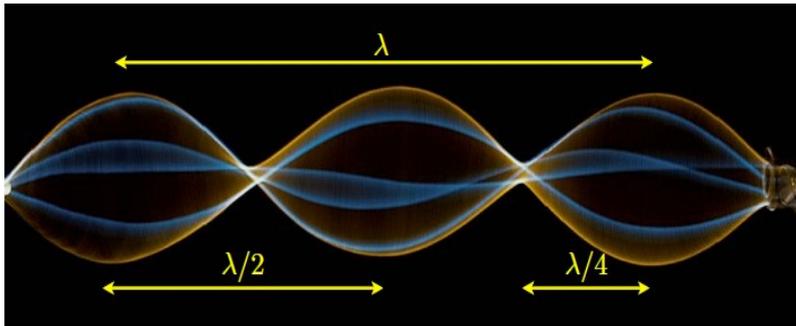
2 ondes de sens quelconques et se croisant :

→ **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

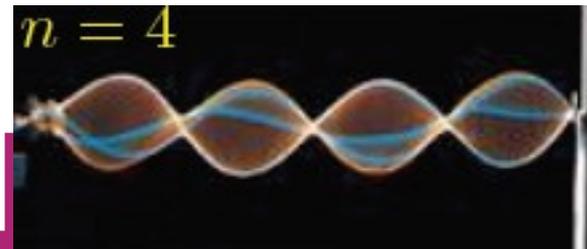
Milieu immobile à ses extrémités (= nœuds)

Milieu « ouvert » à ses extrémités (= ventres)

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

N = 1 : fondamental

N = 2, 3, ... : harmoniques



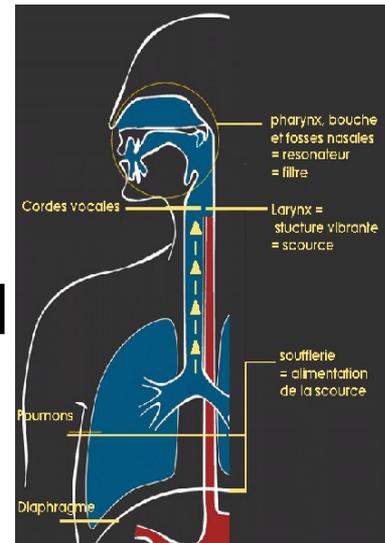
2 – Comment est créée la voix ? Comment l'oreille entend-elle ?

Sous titre

Phonation

La soufflerie :

[poumons + diaphragme ... glotte]

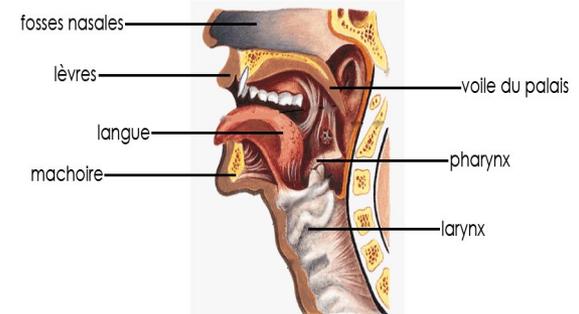


Le système vibreur :

[larynx + cordes vocales]

fondamental

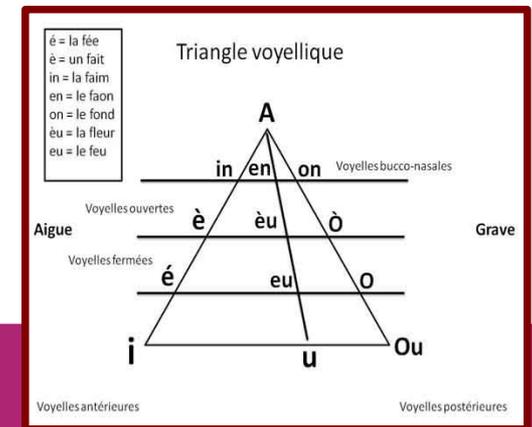
Points de réglages résonantiels :



Les résonateurs :

[pharynx + bouche + nez]

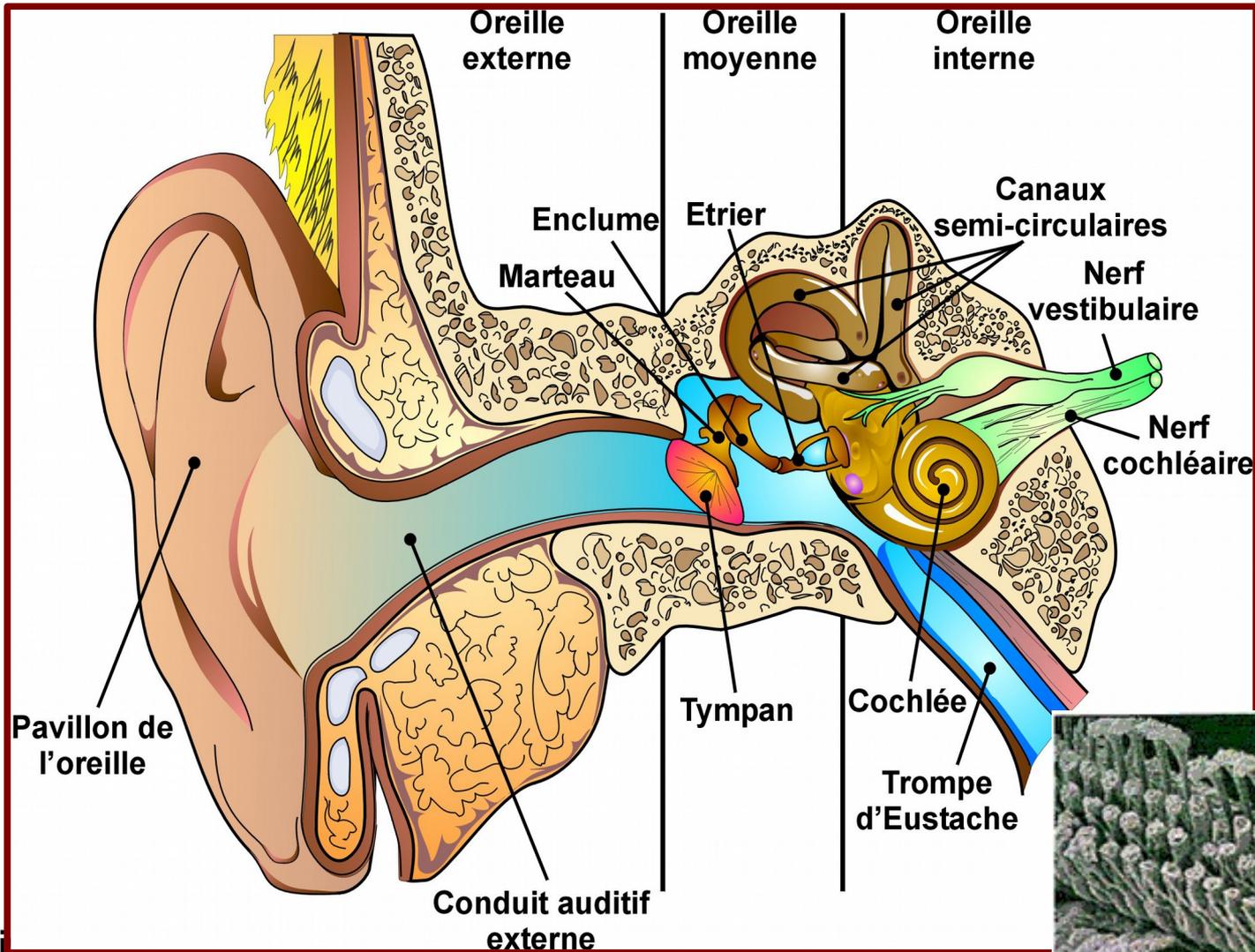
harmoniques



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



3 – Le plaisir d'entendre ou comment expliquer la richesse d'un son ?

Quantifier la sensation auditive ? Notion de son pur, son complexe ?

TIMBRE C'est la superposition d'ondes de fréquences différentes

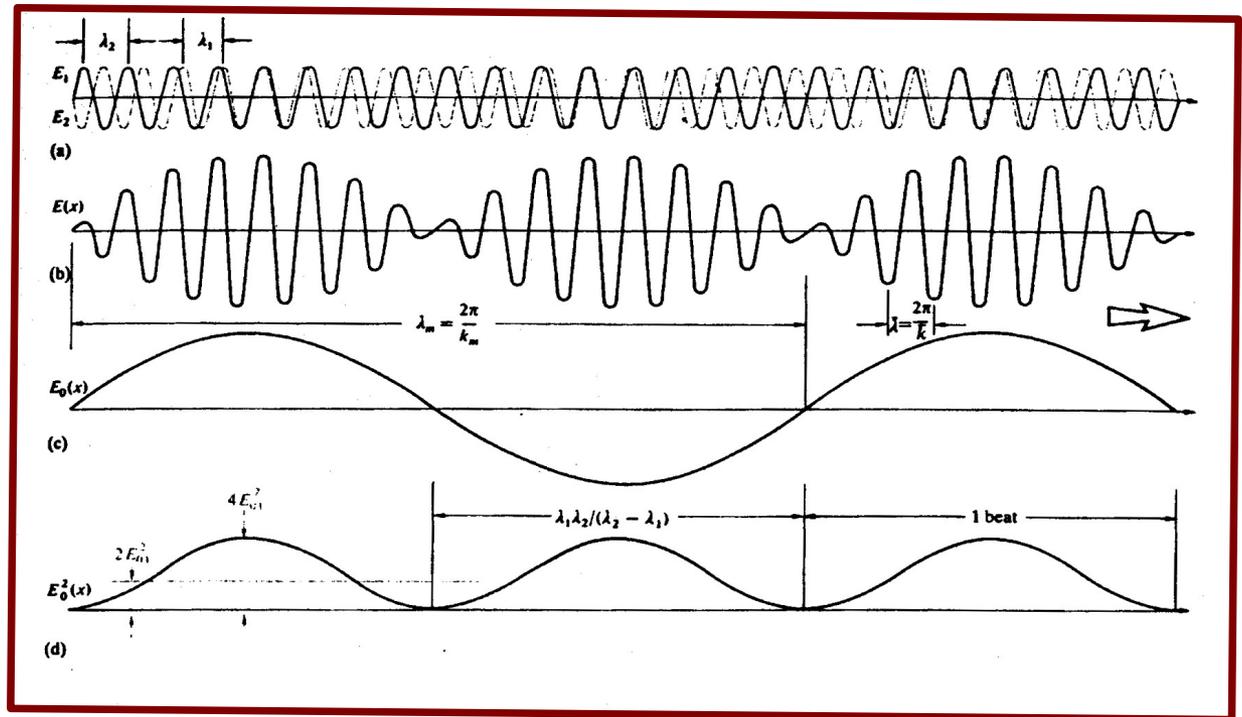
2 ondes : battement

Les deux ondes

Leur somme

Leur enveloppe

Intensité



Application :

Un instrument est « accordé », lorsqu'il joue exactement la 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 ($\Delta f > \text{qq Hz}$)
- accordeur de piano

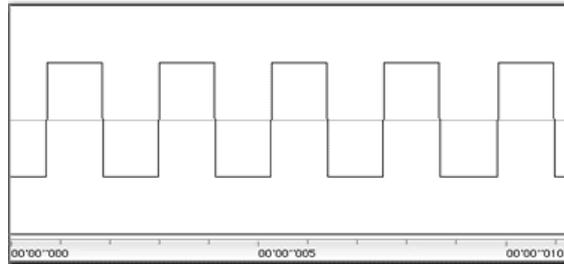
TIMBRE C'est la superposition d'ondes de fréquences différentes

Plusieurs ondes

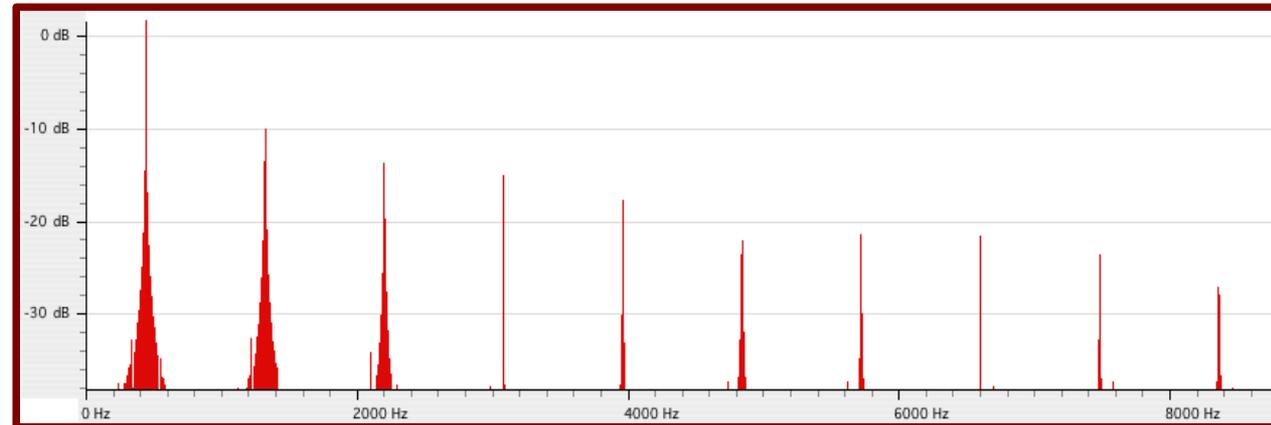
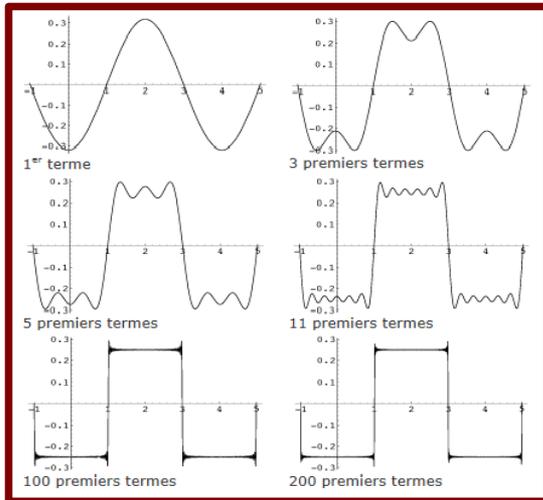
Théorème de Fourier :

Tout signal périodique de fréquence f se décompose en une somme de sinusoïdes de fréquences $f, 2f, 3f, 4f, \dots$, appelées harmoniques.

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

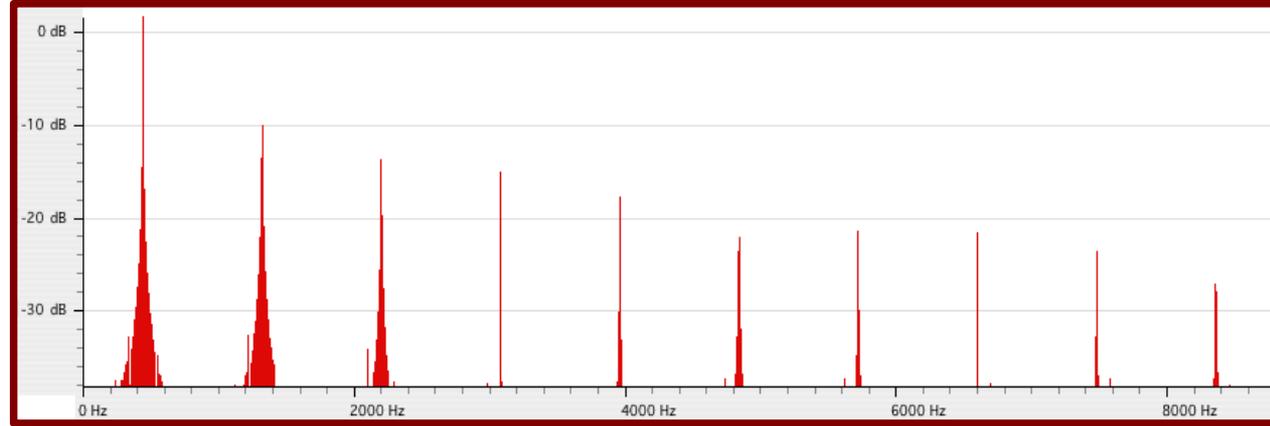
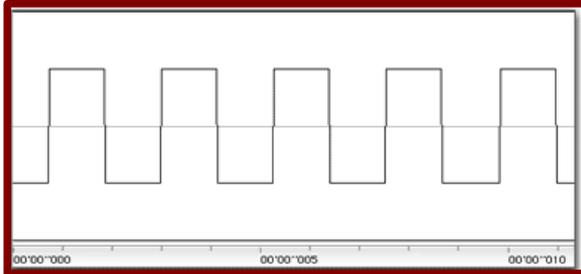


Créneau à 440 Hz

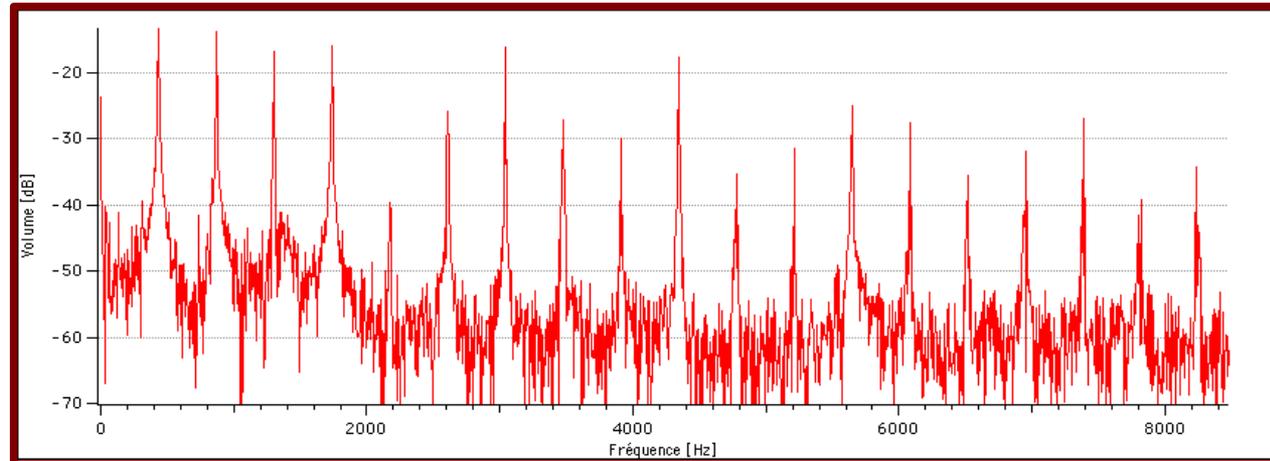
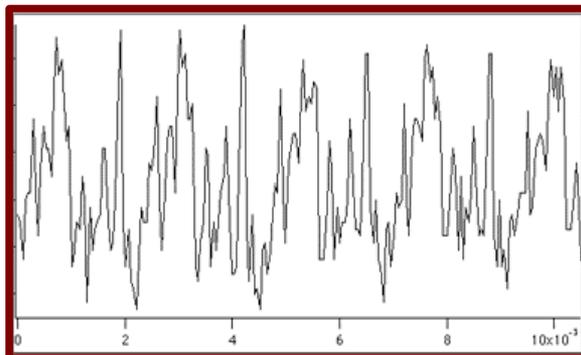


TIMBRE C'est la superposition d'ondes de fréquences différentes

Plusieurs ondes

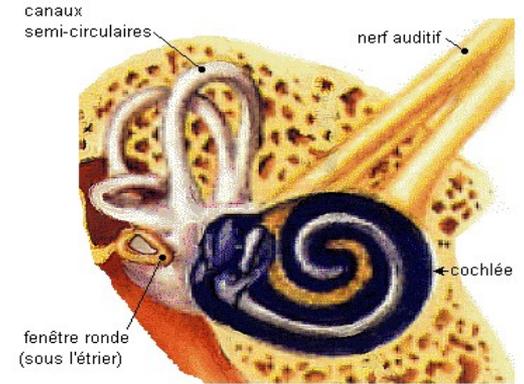


violon à 440 Hz



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

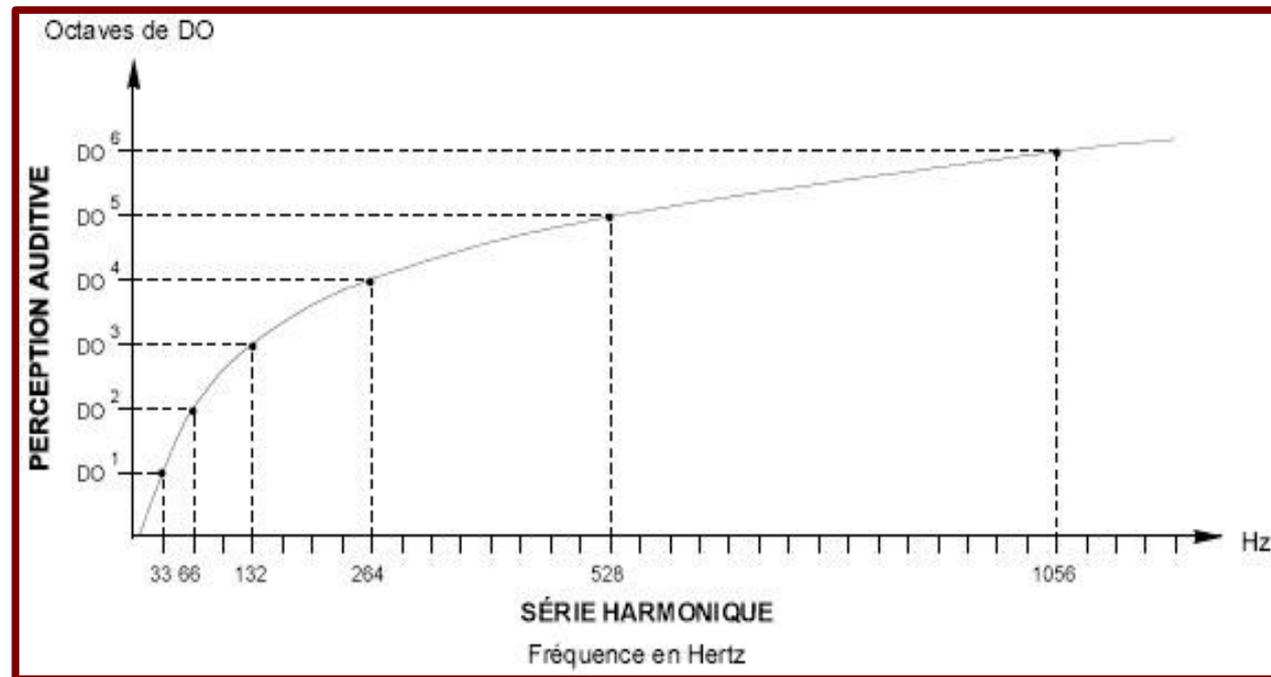
- Lorsque la fréquence est multipliée par 2, le cerveau reconnaît la similitude des termes paires de la série : $A_{2n} \sin(2\pi n f t)$: il donne le même nom au 2^{ème} son en précisant que l'un est plus grave que l'autre

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

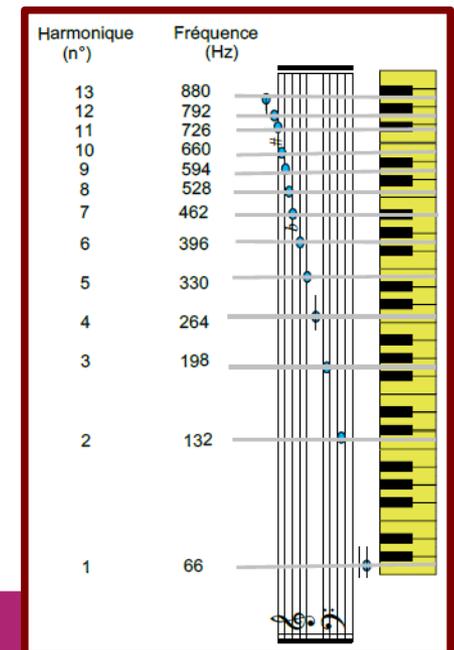
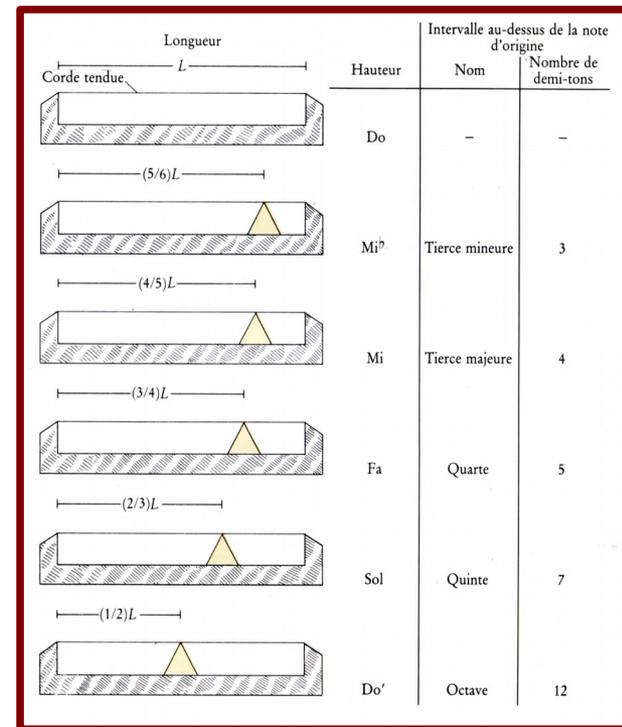
La perception auditive est logarithmique ...

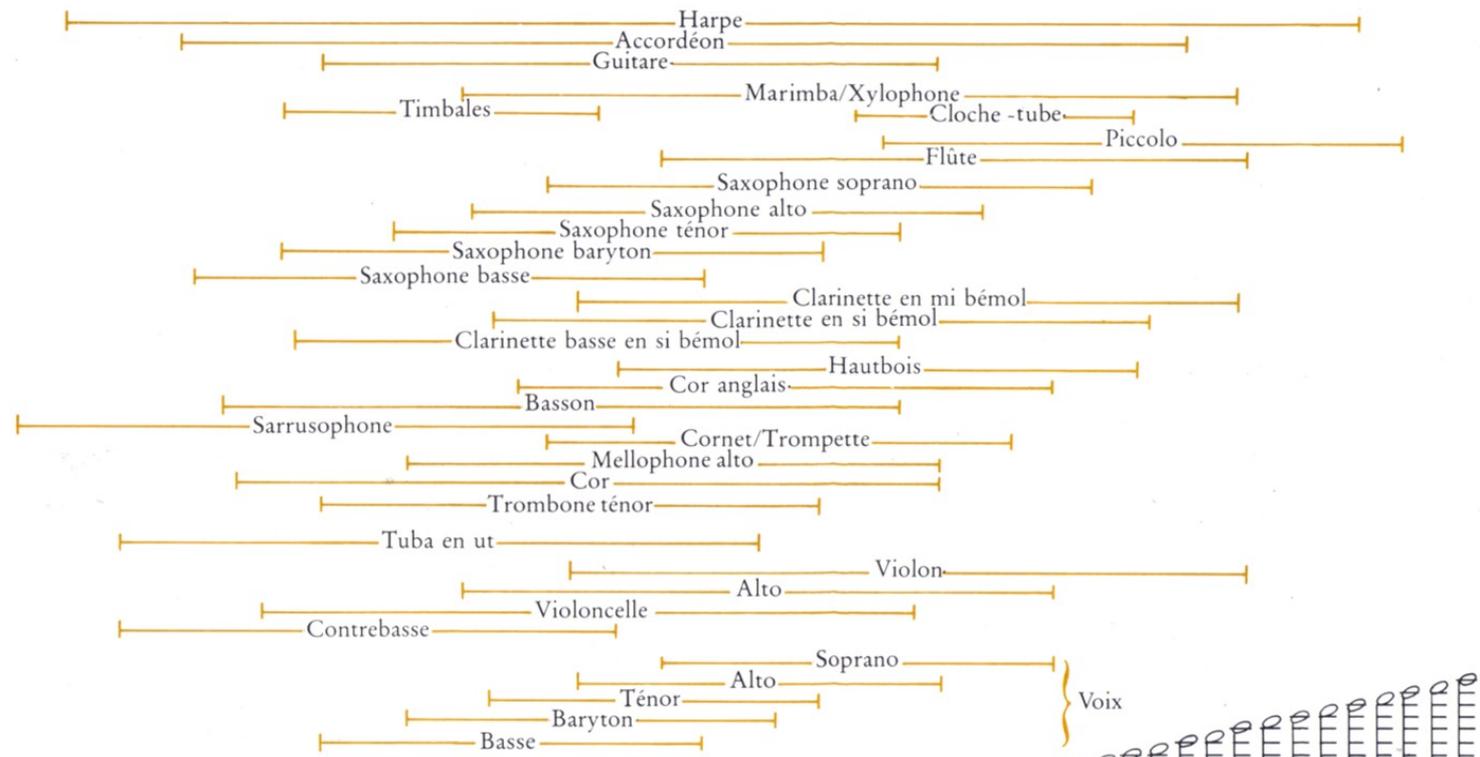
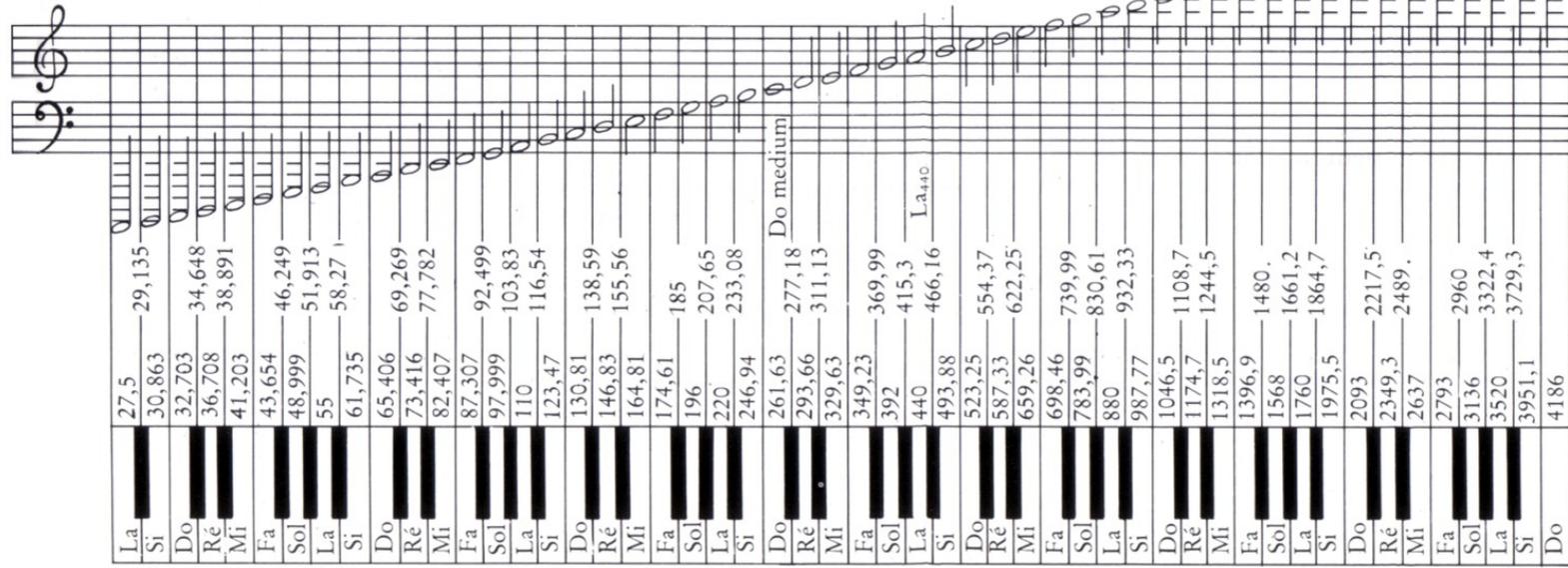
- L'oreille est plus sensible au rapport entre deux fréquences qu'à leur soustraction.
 - Perception du Do 66 Hz et du Do 33 Hz (distance 33 Hz ; rapport 2:1)
 - Perception du Do 528 Hz et du Do 1056 Hz (distance 528 Hz ; rapport 2:1)
- La distance séparant les Do 33 et 66 Hz semble identique à la distance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

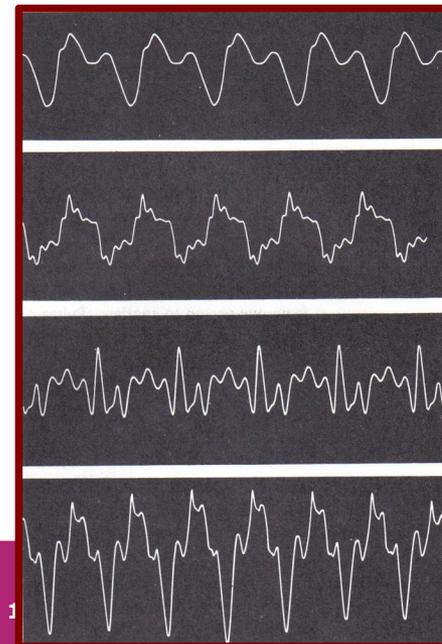
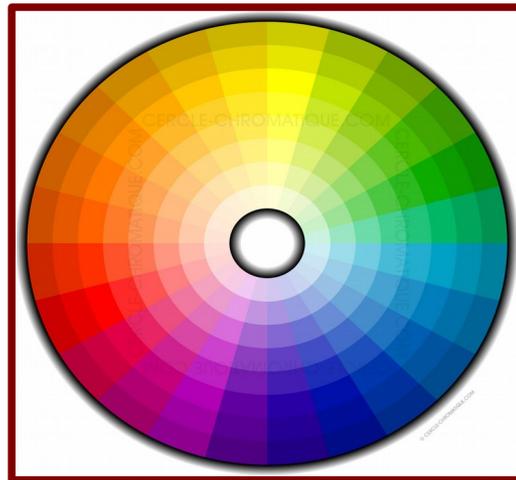




Œil

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

4 – Comment fonctionne le violon ? La flûte ? Le tambour ?

Instruments de musique

Cordes des violons, guitares, harpes, luths, pianos, ...

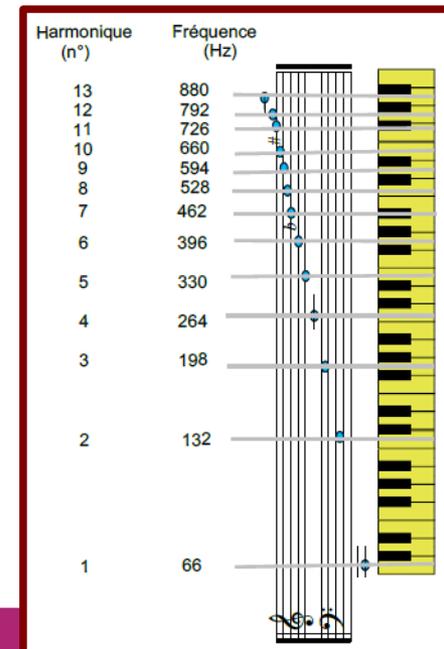
- fréquences de résonance f_R directement liées à la masse, la longueur et la tension de la corde
- tension plus élevée et longueur plus courte : f_R augmente
- excitation en frappant ou pinçant une corde (= impulsion contenant toutes les fréquences) : les fréquences non égales à nf_R sont rapidement atténuées, seules subsistent les vibrations harmoniques que nous entendons comme note musicale

chevalet



caisse

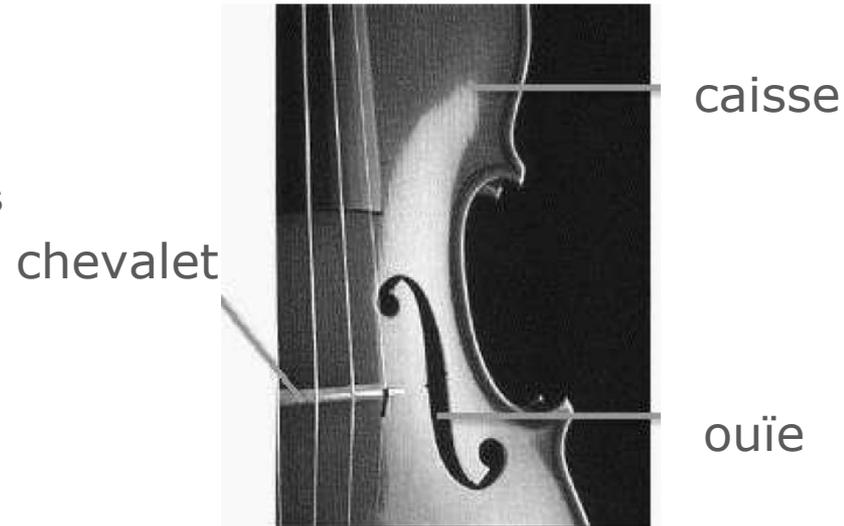
ouïe



Comment le son est-il amplifié ?

Transmission mécanique

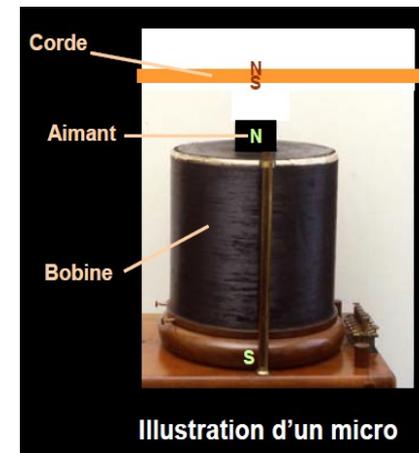
- Exemple du violon :
 - Les vibrations des cordes sont transmises au chevalet qui les transmet à la caisse du violon.
 - Les vibrations du bois produisent des variations du volume d'air situé à l'intérieur de la caisse. L'air est successivement aspiré et expulsé par les ouïes
 - La qualité du violon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



Comment le son est-il amplifié ?

Transmission électromagnétique

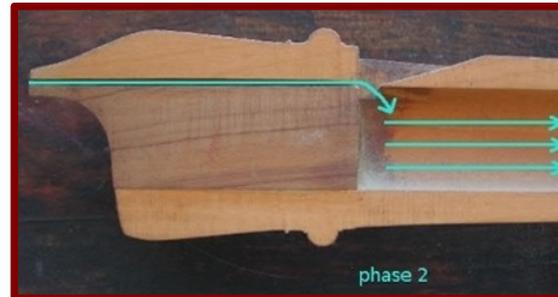
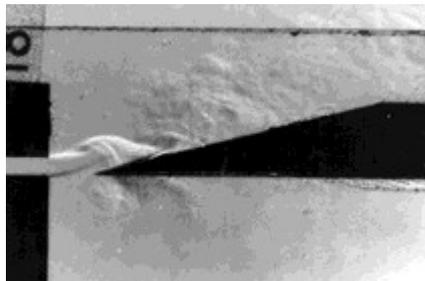
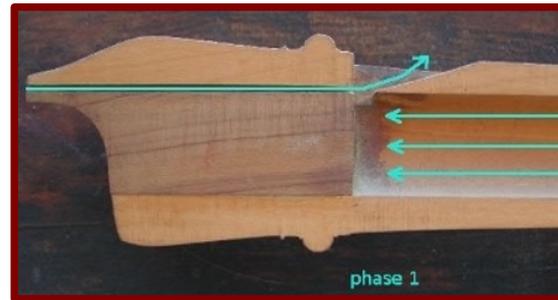
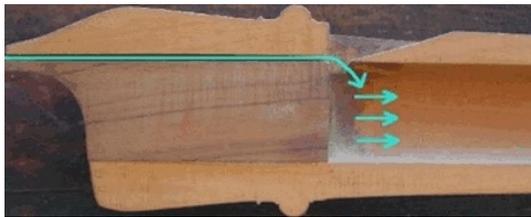
- Exemple de la guitare
 - Micro, simple fil enroulé autour d'un aimant, placé sous chaque corde
 - La corde ferromagnétique (Ni-Fe) baigne dans le champ magnétique de l'aimant : en vibrant elle perturbe les lignes de champ et crée une force contre électromotrice au sein de la bobine, se traduisant à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



Instrument de musique

Longueur du tube d'une flûte

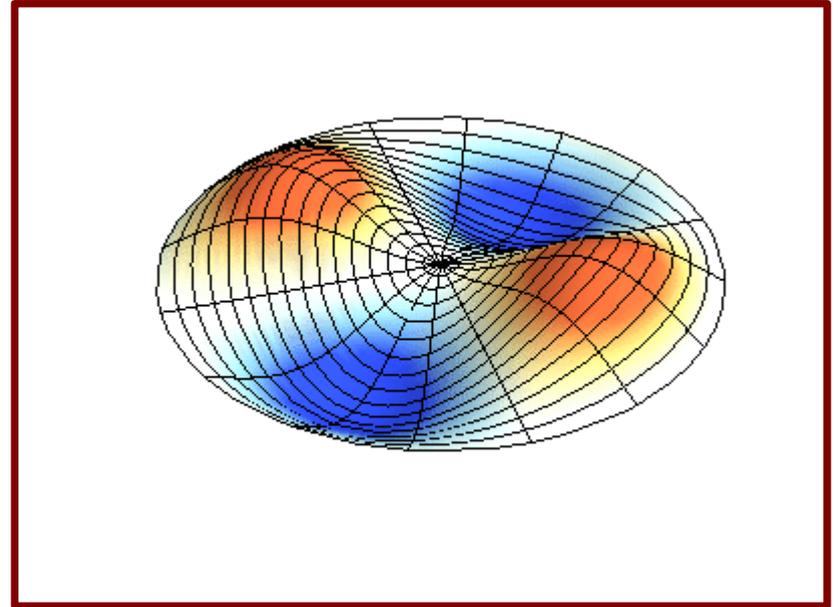
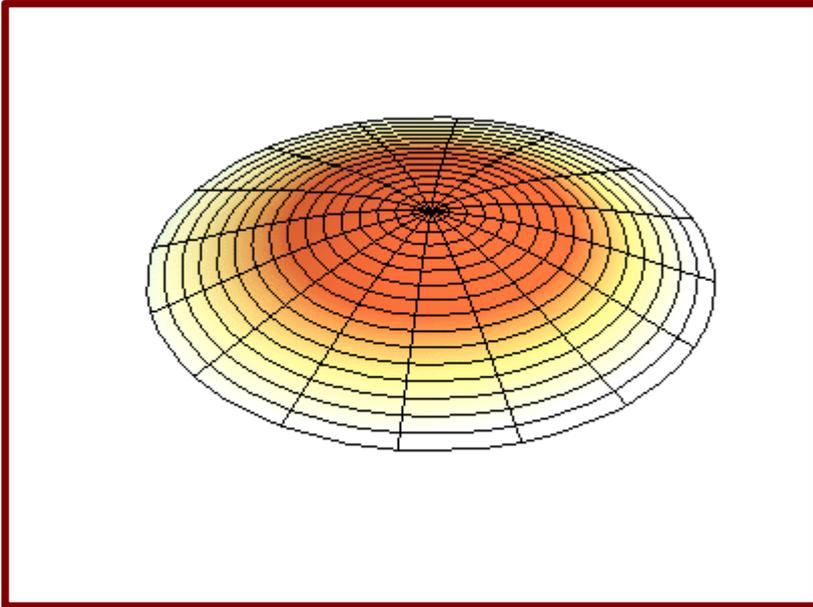
- flûtes à bec ou traversières : tuyaux cylindriques ouvert - ouvert
- clarinettes et cuivres : tuyaux cylindriques ouvert - fermé
- saxophones, hautbois, bassons : tuyaux coniques fermés (à un côté)



<http://www.flute-a-bec.com/acoustique-embouchure.html>

Instruments de musique

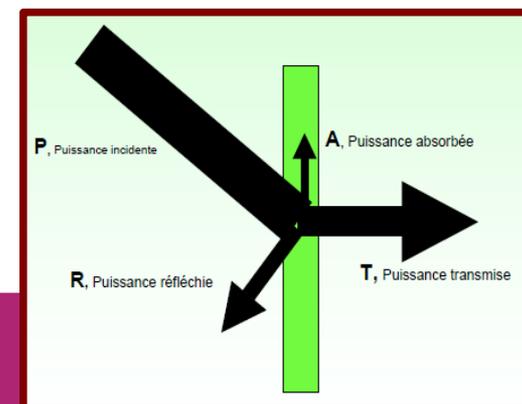
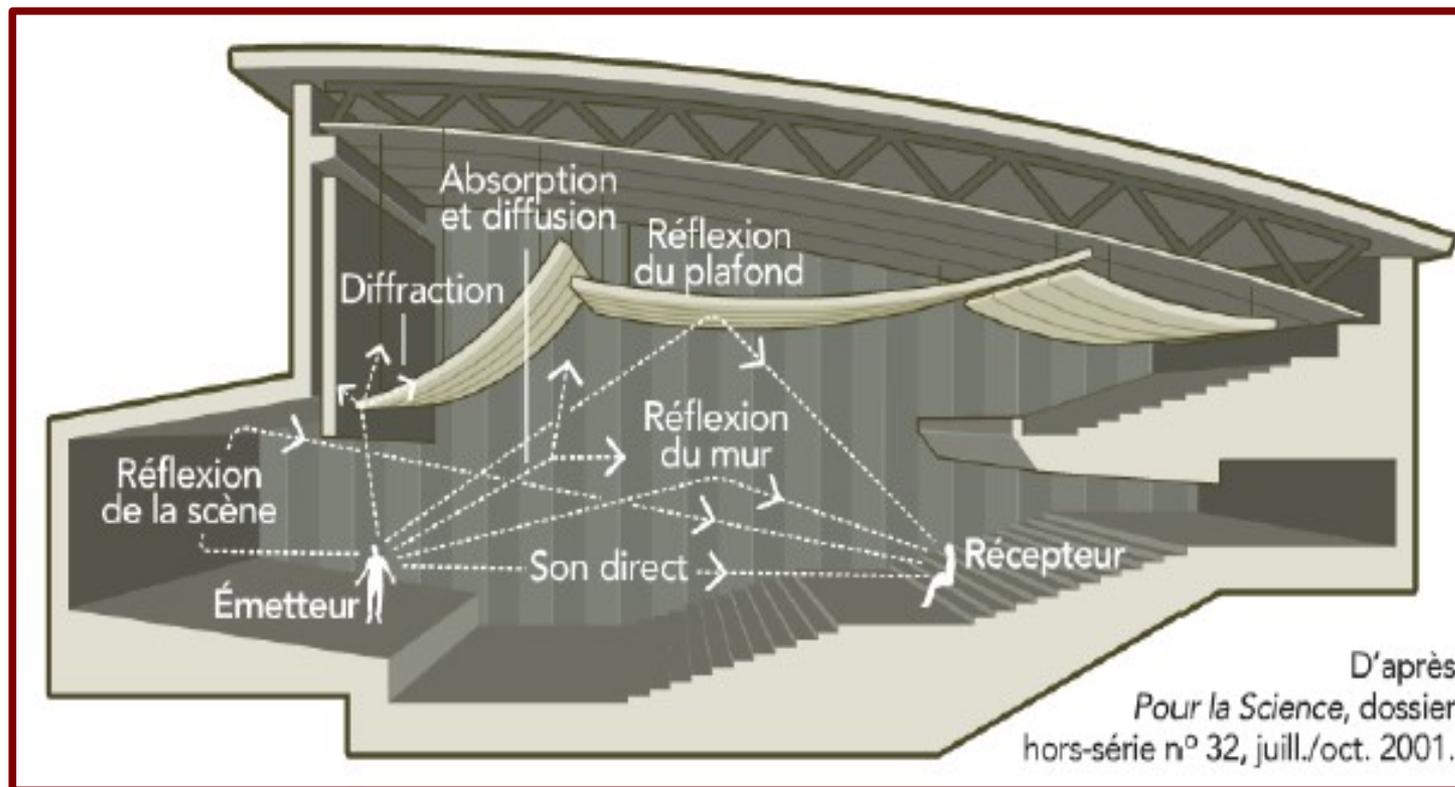
Membrane d'un tambour



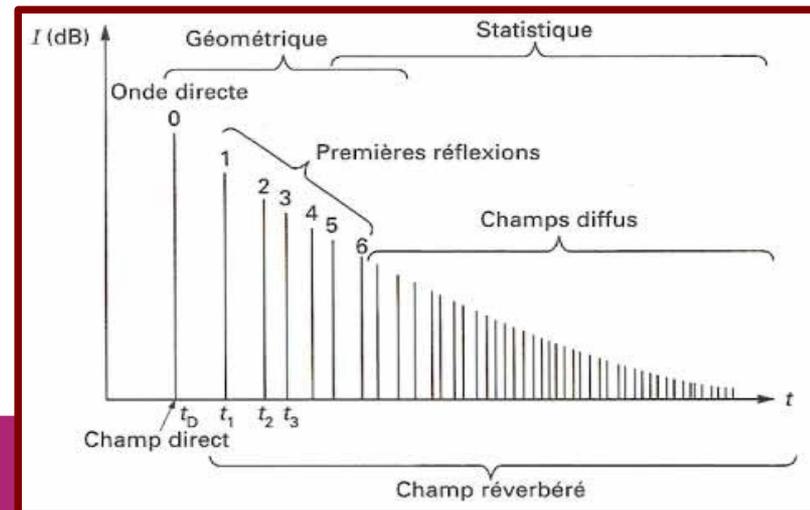
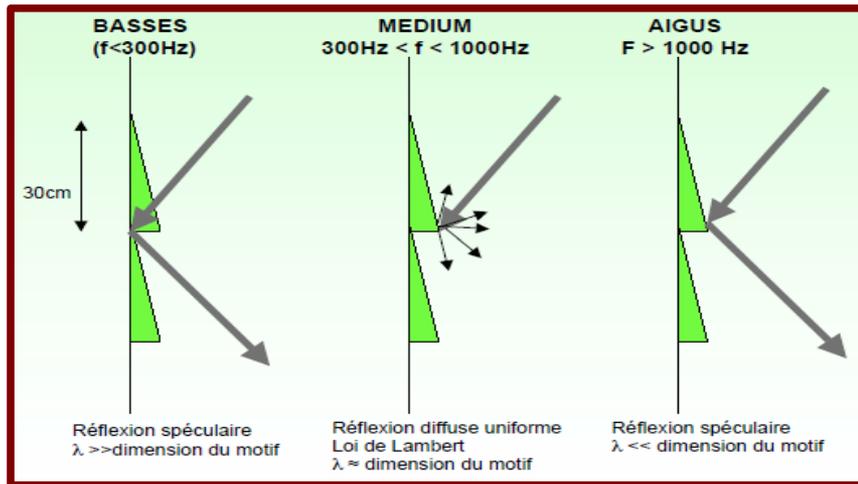
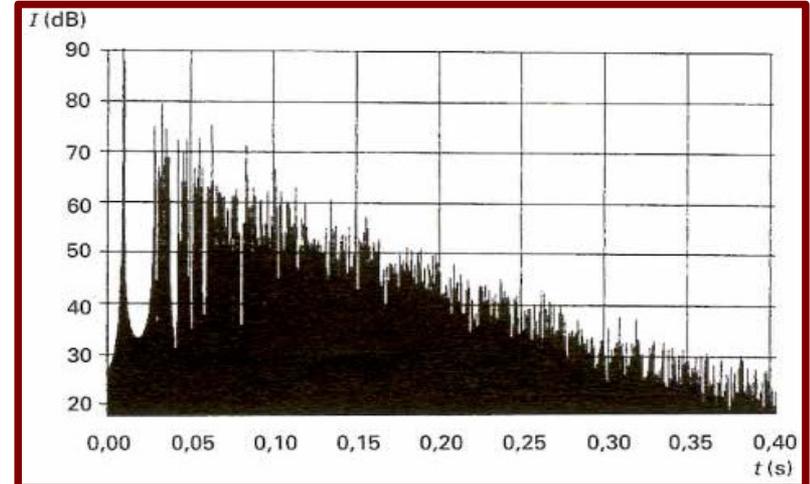
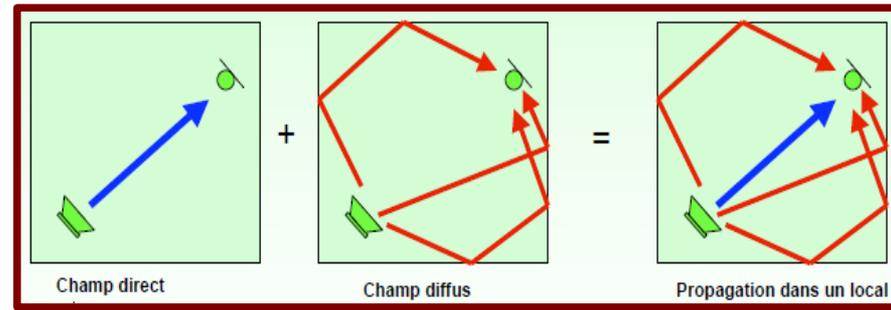
5 – Acoustique architecturale

Interaction son – matière ?

Acoustique des salles



Réflexion

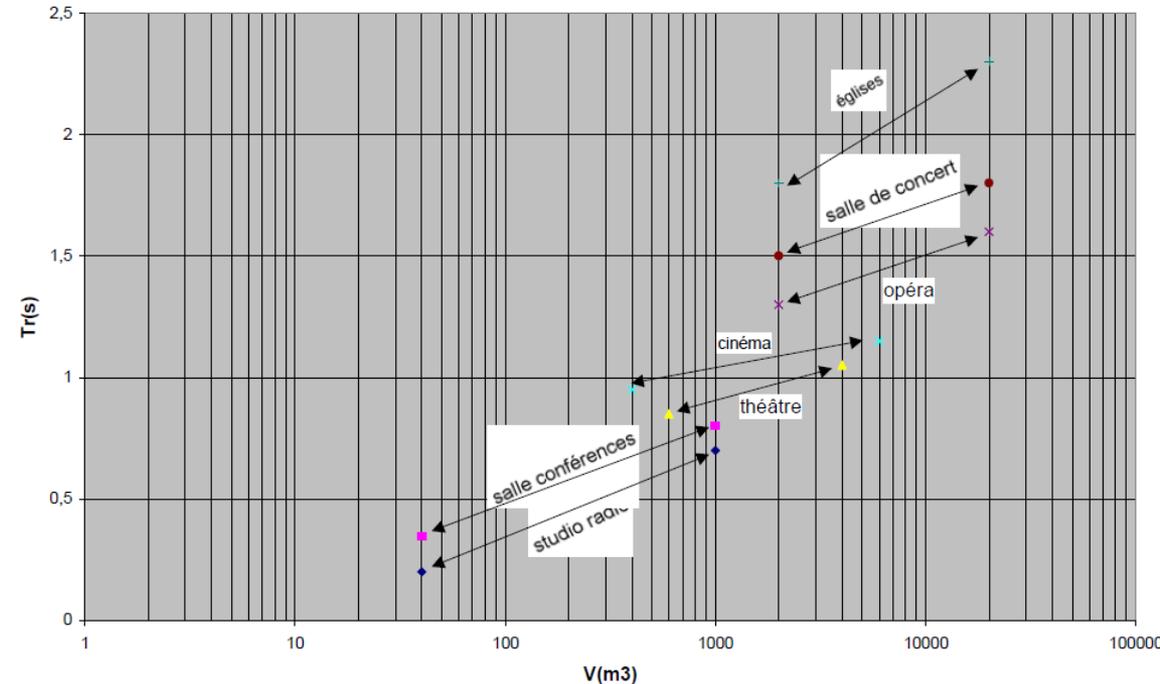


Temps de réverbération T_r

Lorsque les sources s'arrêtent, le récepteur peut continuer à capter les ondes réfléchies pendant un certain temps T_r .

T_r = temps, en secondes, mis par le signal pour décroître de 60 dB (i.e. intensité 10^6 fois plus faible) après l'arrêt de la source

Formule de Sabine
$$T_r = \frac{0,16 V}{\sum \alpha S}$$



Chaque matériau peut être caractérisé par son coefficient d'absorption acoustique α , dépendant de la fréquence. Les valeurs de coefficient d'absorption acoustique moyen pour quelques matériaux courants sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :

matériau	moquette	béton	plâtre	mousse	bois
α	0,26	0,050	0,040	0,60	0,10

Extrait de l'arrêté du 25 avril 2003

relatif à la limitation du bruit dans les établissements d'enseignement

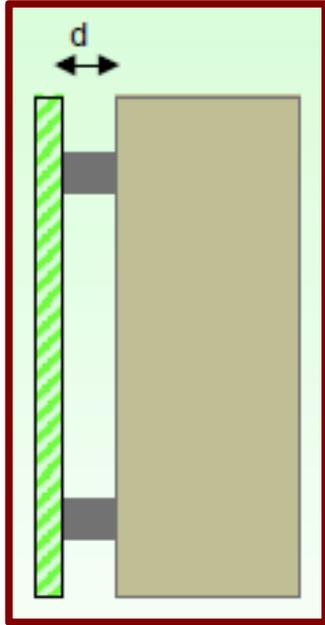
Pour un local dont le volume est inférieur à 250 m^3 , le temps de réverbération doit être compris entre 0,4 s et 0,8 s.

Pour un local dont le volume est supérieur, il sera compris entre 0,6 s et 1,2 s.

Absorption

Graves

Panneaux fléchissants

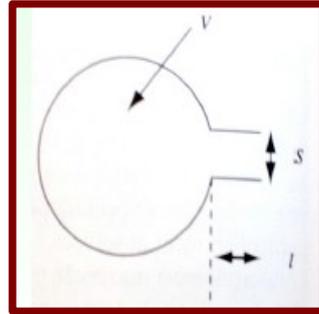


$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{\rho_s d}}$$

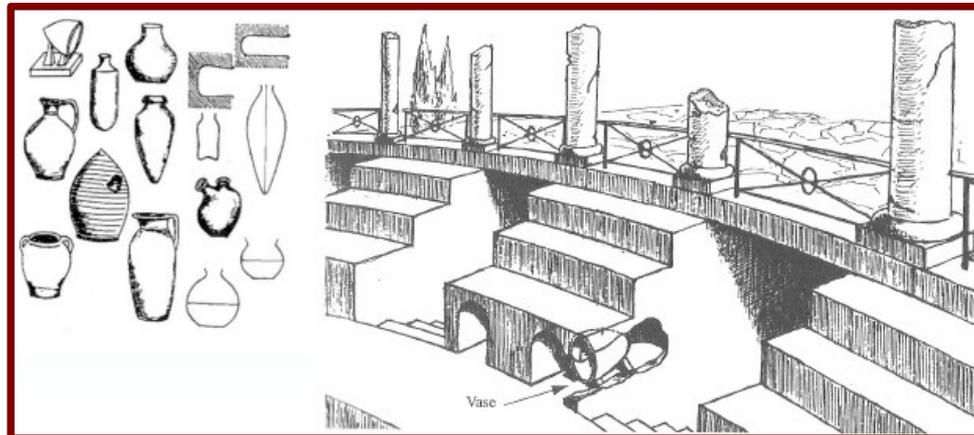
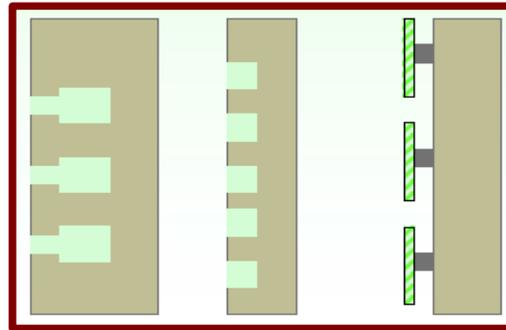
Contreplaqué
 $\rho_s = 5 \text{ kg/m}^2$ $d = 8 \text{ cm}$
 $f_0 = 95 \text{ Hz}$

Médiums (500-2000 Hz)

Résonateurs

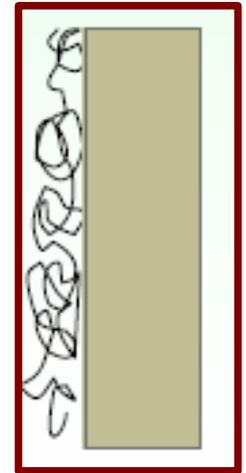


$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\gamma \frac{\rho s}{\rho l V}}$$



Aigus

Matériaux fibreux



6 – 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)

L'univers est une symphonie

Théorie des cordes pour unifier relativité générale et physique quantique

- 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



Maths et musique de Rémi Coulon : <http://rcoulon.perso.math.cnrs.fr/papiers/musique.pdf>

Musique et Mathématiques par Carine Pascal et Nathalie Tomas :

<http://www.sciences.ch/dwnldbl/mathematiques/MatheMusic.pdf>

Maths et Musique - Math&Magique #5: <https://youtu.be/dlX6JX4mSQc>

Musique et maths : le génie de Beethoven - Natalya St. Clair :

<https://youtu.be/zAxT0mRGuoY>

CYMATICS: Science Vs. Music - Nigel Stanford : <https://youtu.be/Q3oItpVa9fs>

KEZAKO : Qu'est ce que le mur du son ? <http://kezako.unisciel.fr/kezako-quest-ce-que-le-mur-du-son-2/>

C'est pas sorcier

- **Bruit** : <https://youtu.be/IlhJcfKNk3I>

- **Accordons nos violons** : <https://youtu.be/TZJxosX2mzM>

- **GRANDES ORGUES : Les sorciers ont un tuyau** : <https://youtu.be/vZdEfVjJGgg>

- **VOIX DE FETE** : <https://youtu.be/seExRSquGBQ>

On n'est pas que des Cobayes ! Spéciale Star Wars : Magique ou scientifique ? - #cobayesf5

<https://youtu.be/PZI9obkgF58>

Physique à main levée : Acoustique : [https://www.youtube.com/playlist?](https://www.youtube.com/playlist?list=PLD32868A967DFB89C)

[list=PLD32868A967DFB89C](https://www.youtube.com/playlist?list=PLD32868A967DFB89C)

Le son • TDC N° 1046 Article pdf : [https://www.reseau-](https://www.reseau-canope.fr/tdc/fileadmin/docs/tdc_1046_son/article.pdf)

[canope.fr/tdc/fileadmin/docs/tdc_1046_son/article.pdf](https://www.reseau-canope.fr/tdc/fileadmin/docs/tdc_1046_son/article.pdf)

Les risques auditifs expliqués aux jeunes ados : [http://www.pass-santejeunes-bourgogne-](http://www.pass-santejeunes-bourgogne-franche-comte.org/16-18-ans/bruit-musique-audition/)

[franche-comte.org/16-18-ans/bruit-musique-audition/](http://www.pass-santejeunes-bourgogne-franche-comte.org/16-18-ans/bruit-musique-audition/)

<http://www.ecoute-ton-oreille.com/l-oreille-mode-d-emploi.html>

Ecole d'été de physique e2phi, "Physique et Arts" à Lille en 2004

<http://e2phy.in2p3.fr/2004/e2phy2004.html>

La voix, comment ça fonctionne ? : [http://www.cours-chant-paris.fr/actus/comment-](http://www.cours-chant-paris.fr/actus/comment-fonctionne-voix/)

[fonctionne-voix/](http://www.cours-chant-paris.fr/actus/comment-fonctionne-voix/)

Références



La Musique est-elle une science ? Auteurs : Alain Schuhl, Jean-Luc Schwartz
Editeur : Editions le Pommier (28 octobre 2005) – Belin

Musique et physique. Auteur : Zananiri Chérif. Editeur : Ellipse. Collection : Physique pour tous

TDC, n° 1046, 15 décembre 2012 - Le son. Éditeur : CNDP. Collection : Agir.

Le son. Auteurs : Emmanuel Bernhard, Peter Allen. Editeur : Mango Jeunesse (11 septembre 2002). Collection : Kézako ?

Le son à petits pas. Editeur : Actes Sud Junior (4 septembre 2011). Collection : ACTES SUD JUNIO.

Le son musical : musique, acoustique et informatique. Auteur : John Pierce. Broché: 241 pages. Editeur : Belin (30 septembre 2000). Collection : L'univers des sciences.

Maths & musique- Des destinées parallèles ... Hors- série n° 11. Auteurs : collectif sous la direction de Gilles Cohen. Editeur : POLE paru le : 04/2010. Collection : Bibliothèque Tangente 11

Kepler - Le musicien du ciel. Les génies de la science . Revue : Pour la Science n° 8 - août - novembre 2001

Sons et lumière. Auteur : Bernard Valeur. Editeur : Belin. Collection : Bibliothèque scientifique

Cité scientifique
Bâtiment A3
F-59655 Villeneuve d'Ascq Cedex
T. +33 0 00 00 00 00
www.univ-lille.fr