Université de Lille

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)

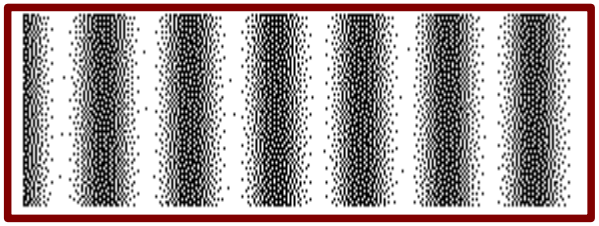
1 – Qu'est-ce que le son ?

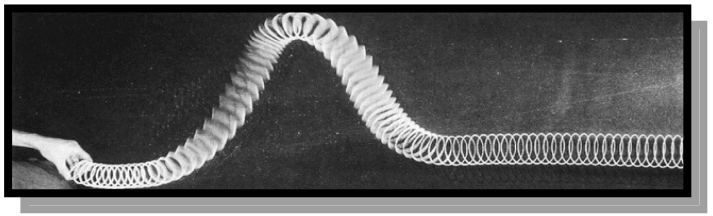
Qu'est ce qu'une onde ?

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 :

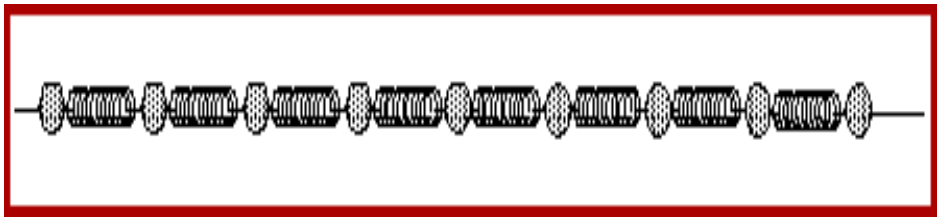
Structure temporelle de la perturbation
Type de déformation du milieu

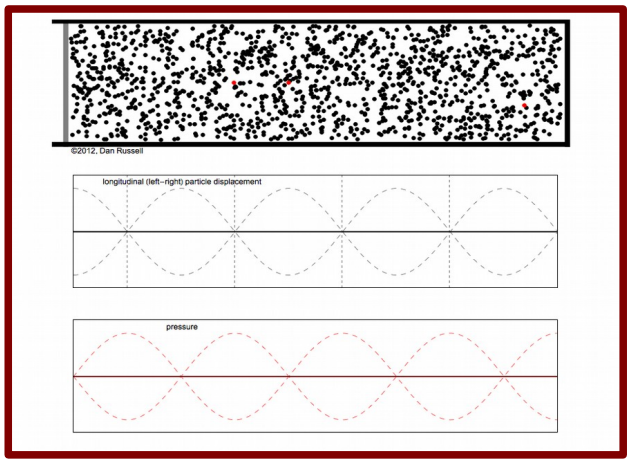
… la propagation est conditionnée par le milieu

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 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 m.s^{-1} dans l'air,
  1500 m.s^{-1} dans l'eau,
  5000 m.s^{-1} dans les solides

$$p = P - P_0 = A\sin\left(2\pi f t\right)$$

$$= A\sin\left(2\pi \frac{c}{\lambda} t\right)$$

$$c = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}}$$

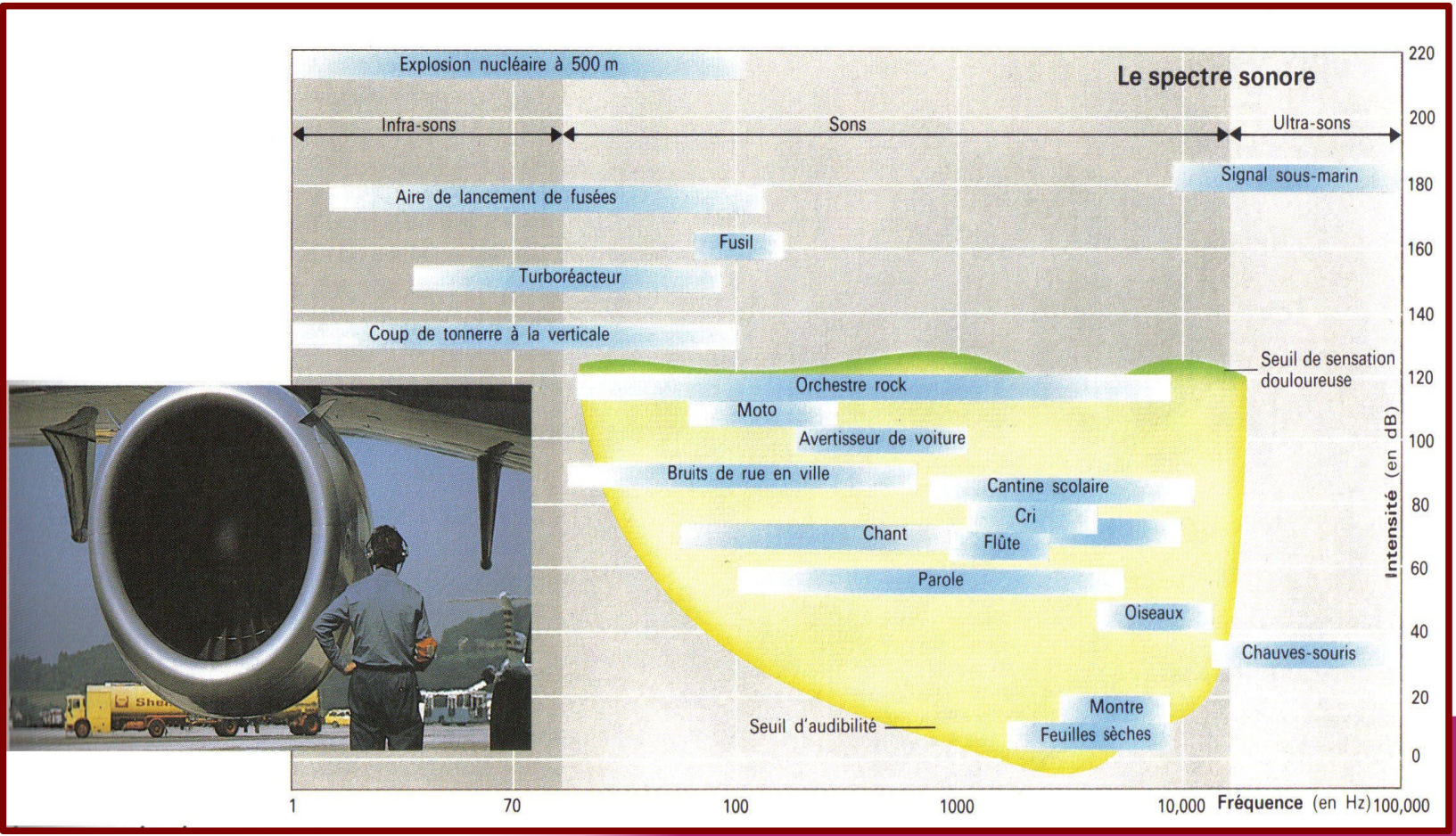
$$= \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \; si \; gaz \; parfait$$

Perception sonore

- Fréquence, entre 20 et 2.10^4 Hz, soit 3 ordres de grandeurs
- Pression acoustique (= surpression), entre 2.10^{-5} et 200 Pa, soit 7 odg
- Intensité acoustique, entre $I_0 = 10^{-12}$ et 140 W.m^{-2}, soit 14 odg

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

Le décibel (dB) est une grandeur sans dimension évaluant la perception ressentie

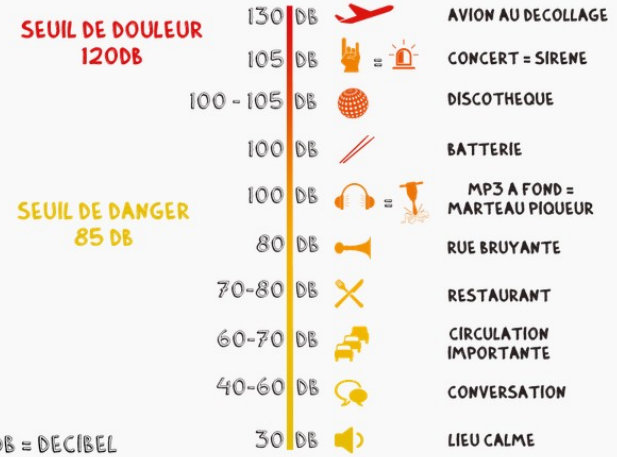


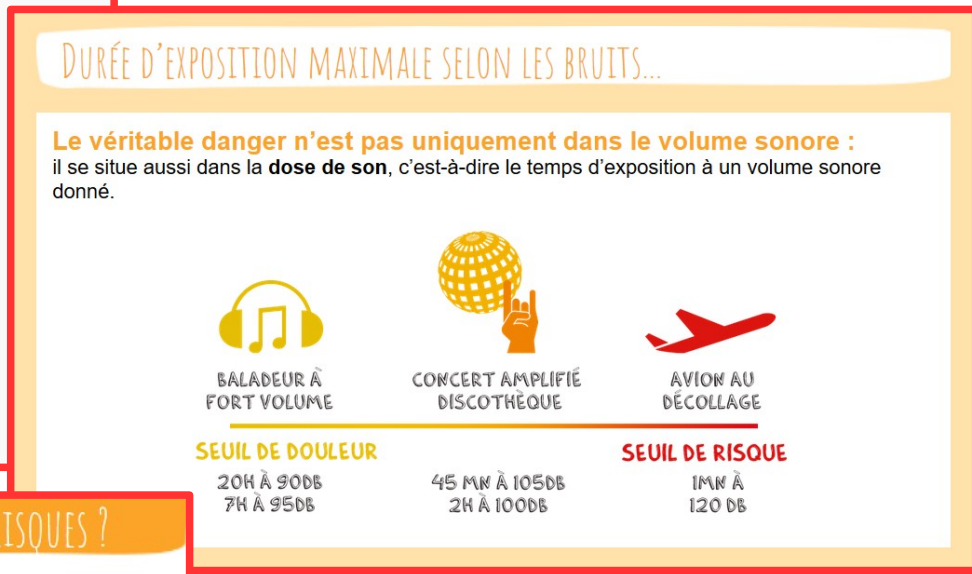
Perception sonore

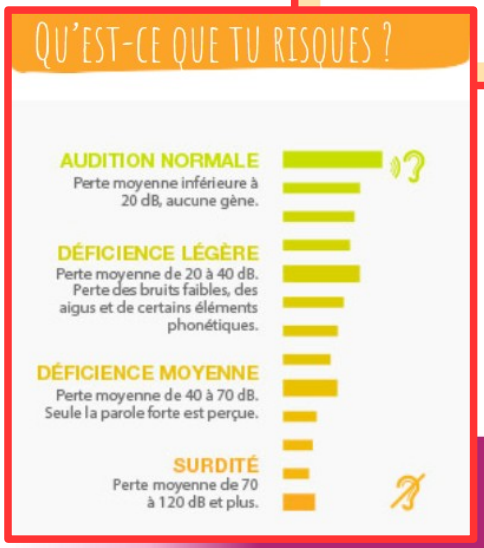
http://www.pass-santejeunes-bourgogne-franche-comte.org/16-18-ans/bruit-musique-audition/

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







Université de Lille

Acoustique et art ?

Bruit

- Son inopportun, indésirable
  (signal sans information se superposant à un signal utile)
- Énergie acoustique audible pouvant être néfaste à la santé
  (2ème cause de pathologie professionnelle : surdité, stress, fatigue)

Son musical

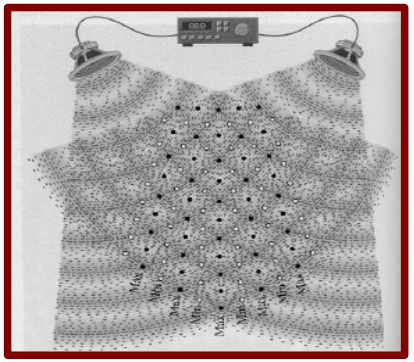
- Son qui procure des sensations agréables à l'oreille
- 4 propriétés :
  - Hauteur (fréquence) : *son grave*, *médium*, *aigu*
  - Durée : *son court*, *long*
  - Intensité (mesurée en dB) : *niveau sonore faible*, *fort*
  - Timbre (amplitude) : *son pur*, *complexe*

2 – Comment est produit le son d'un instrument de musique ? Comment est-il amplifié ? Qu'est ce qui en fait la richesse ?

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

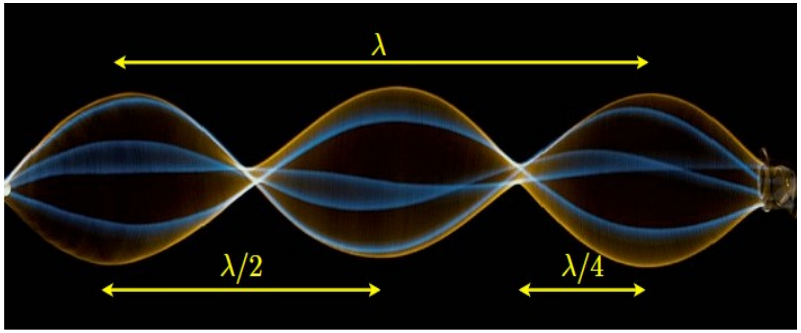
2 ondes de sens quelconques et se croisant :

⟶ **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

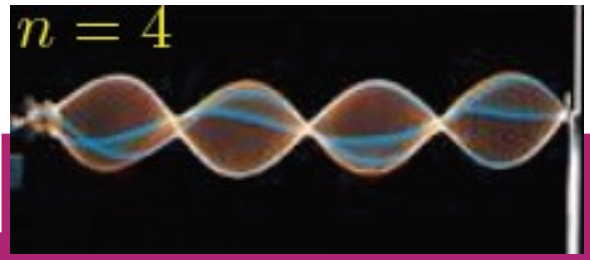
Milieu immobile à ses extrémités (= nœuds)

Milieu « ouvert » à ses extrémités (= ventres)

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

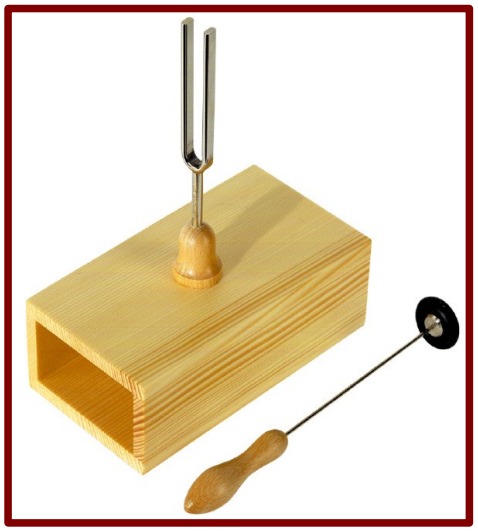
N = 1 : fondamental

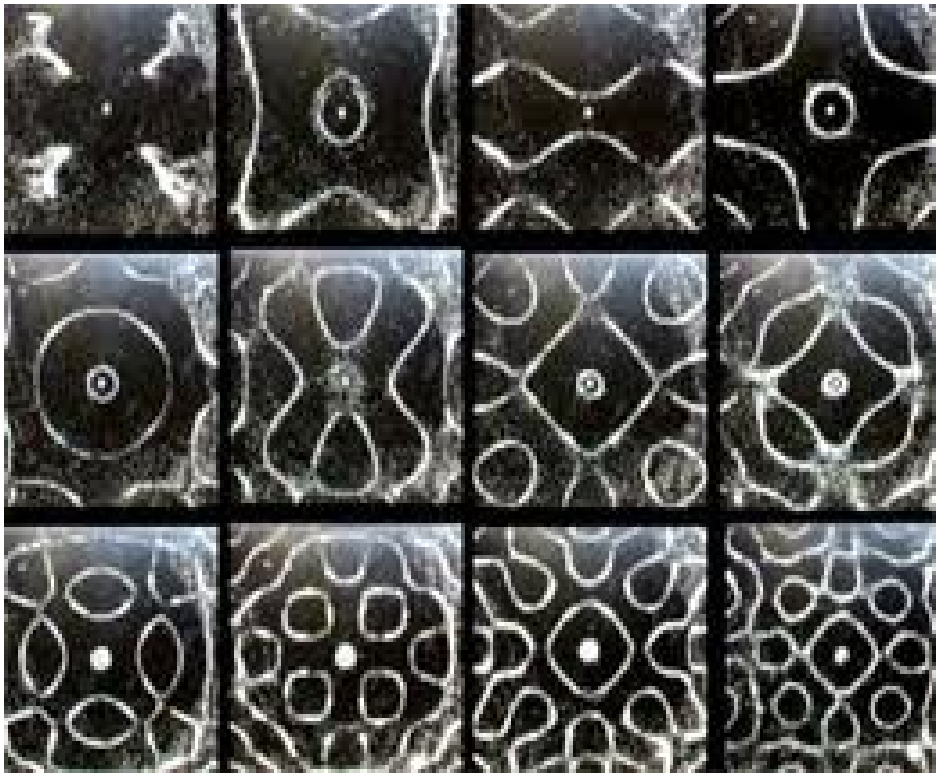
N = 2, 3, … : harmoniques



Université de Lille

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

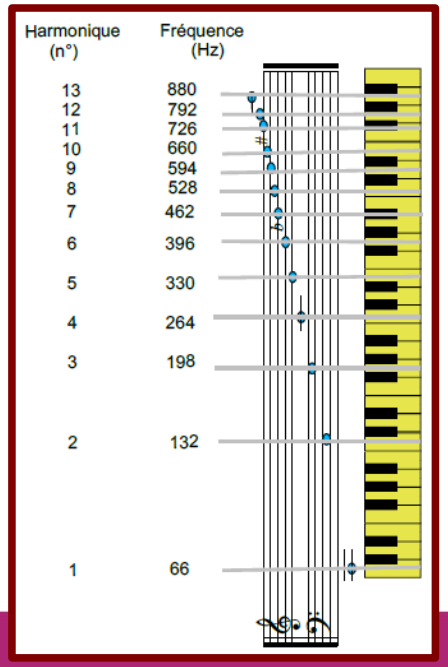




Instruments de musique

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

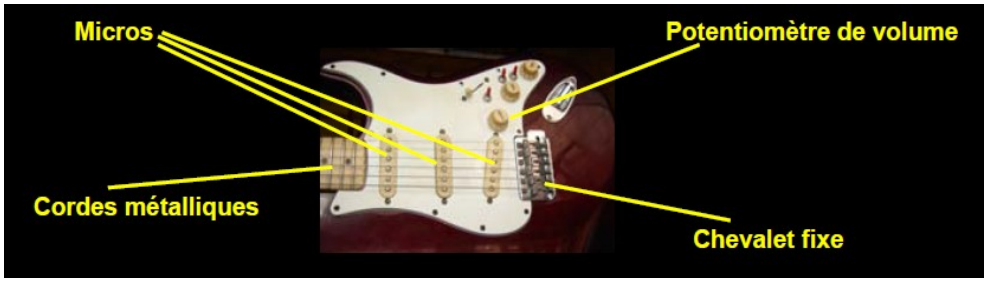


Comment le son est-il amplifié ?

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.

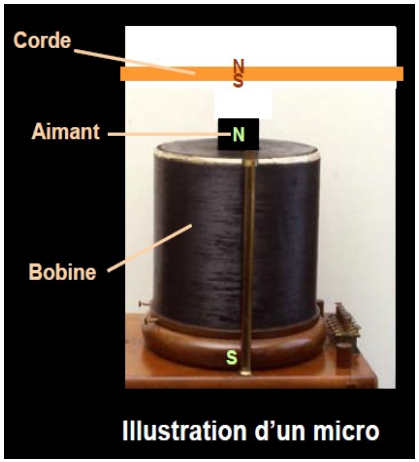
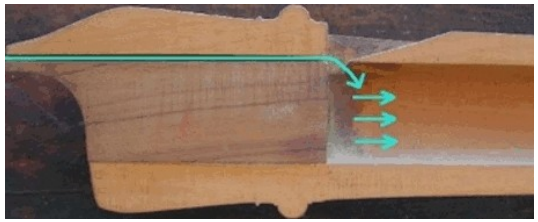


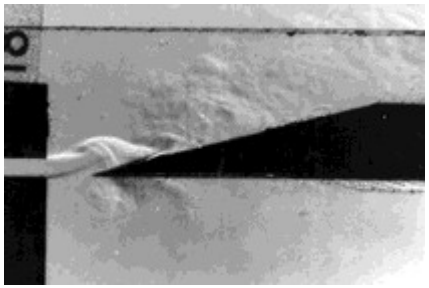
Illustration d'un micro

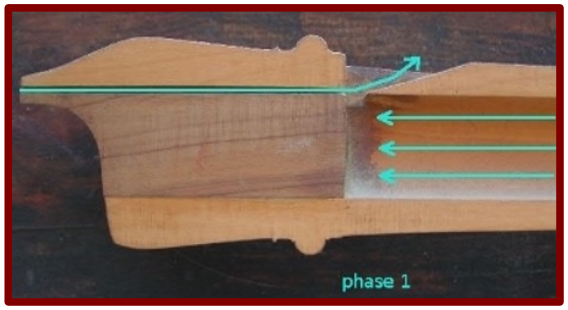
Instruments de musique

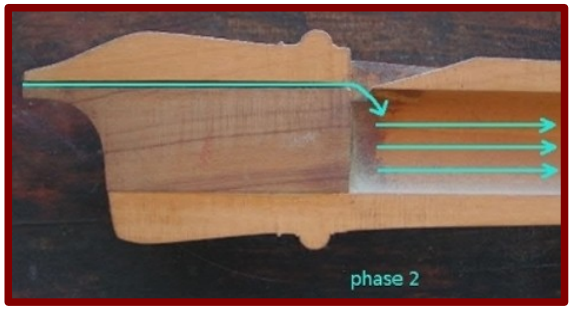
Longueur du tube d'une flûte

- 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)





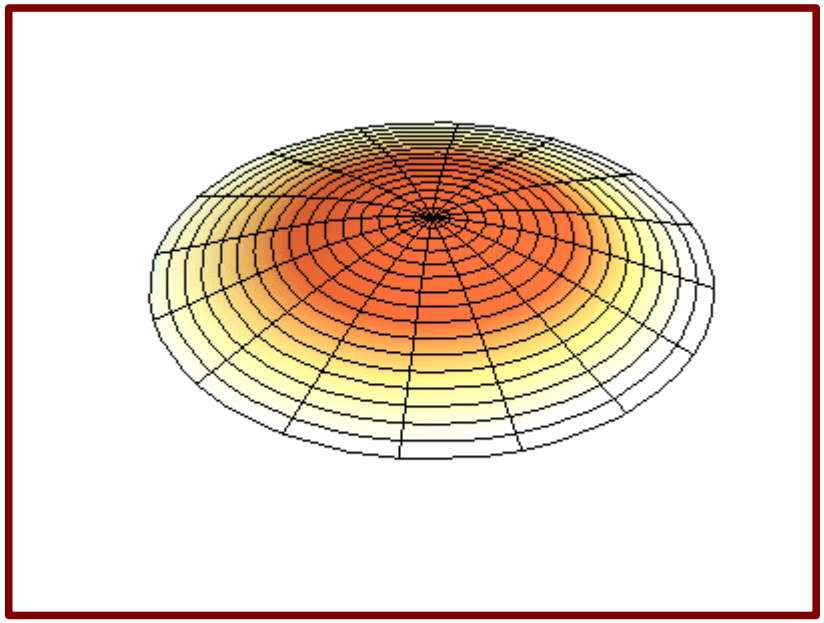


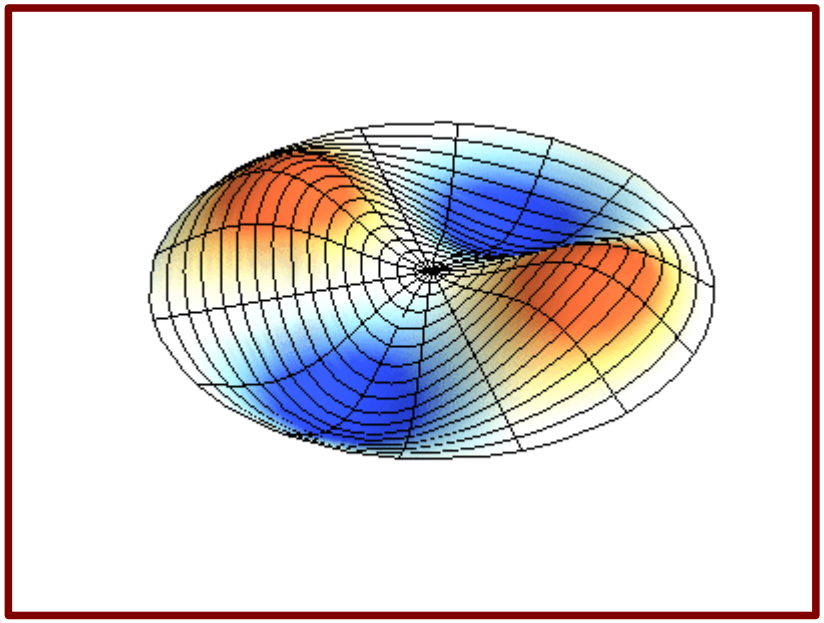


http://www.flute-a-bec.com/acoustique-embouchure.html

Instruments de musique

Membrane d'un tambour

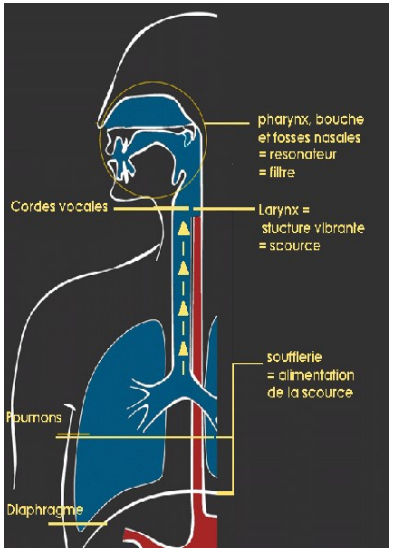




Phonation

La soufflerie :

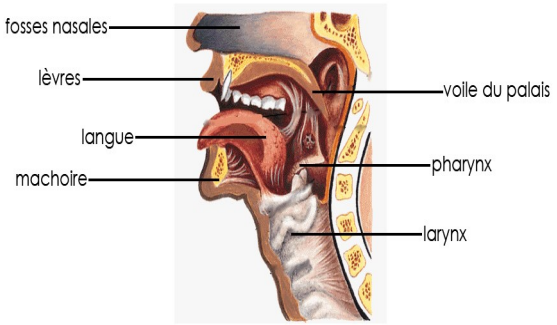
[poumons + diaphragme … glotte]



Le système vibrateur :

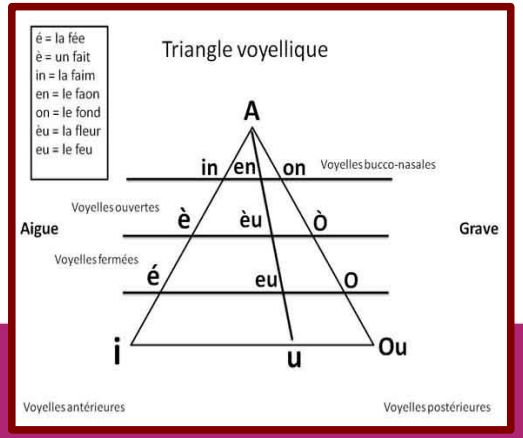
[larynx + cordes vocales] fondamental

Points de réglages résonantiels :



Les résonateurs :

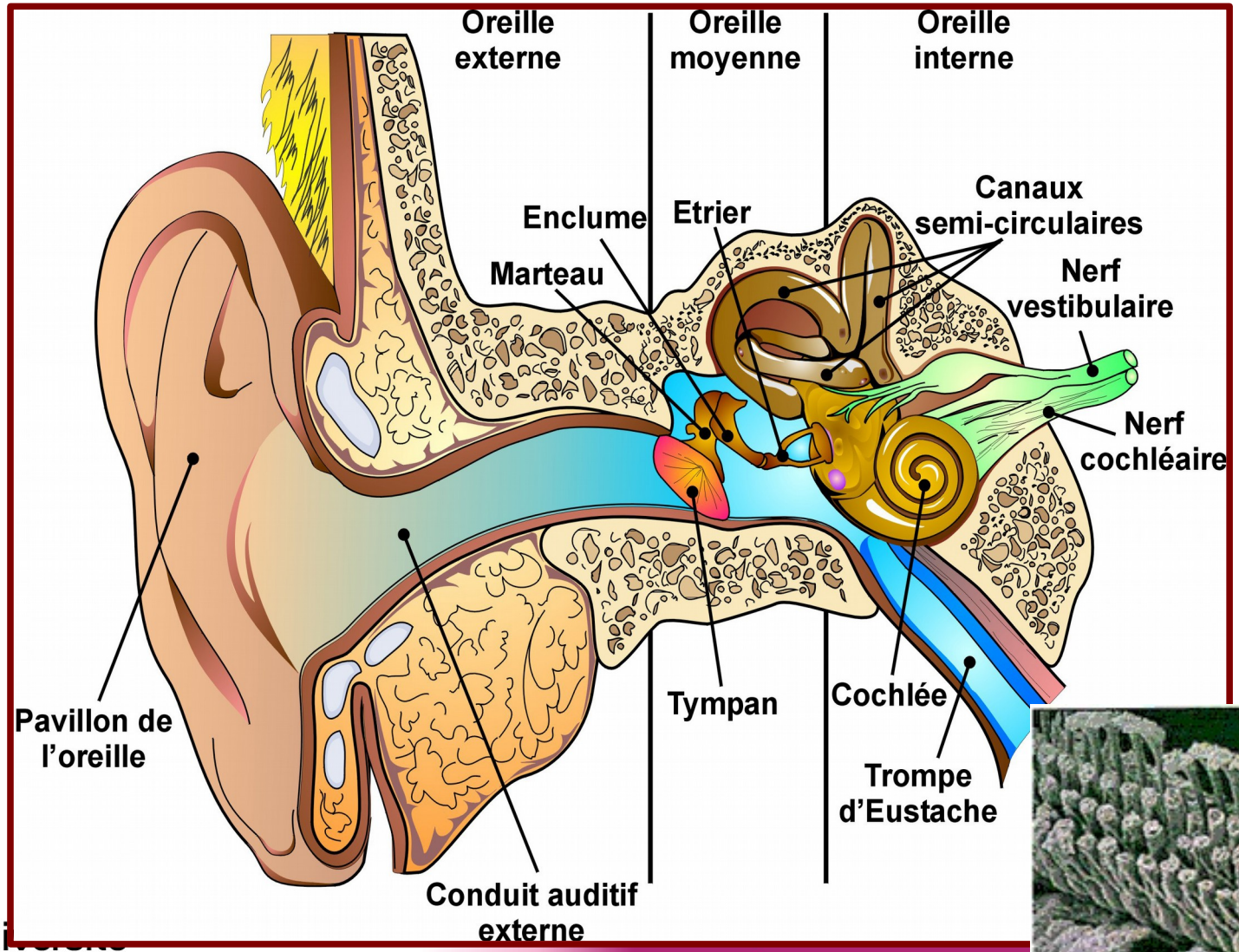
[pharynx + bouche + nez] harmoniques



Ouïe

Seuils :

seuil d'audibilité	0 dB	10^{-12} Wm^{-2} ou # 2.10^{-5} Pa
seuil de douleur	130 dB	10 Wm^{-2} ou # 32 Pa



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

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

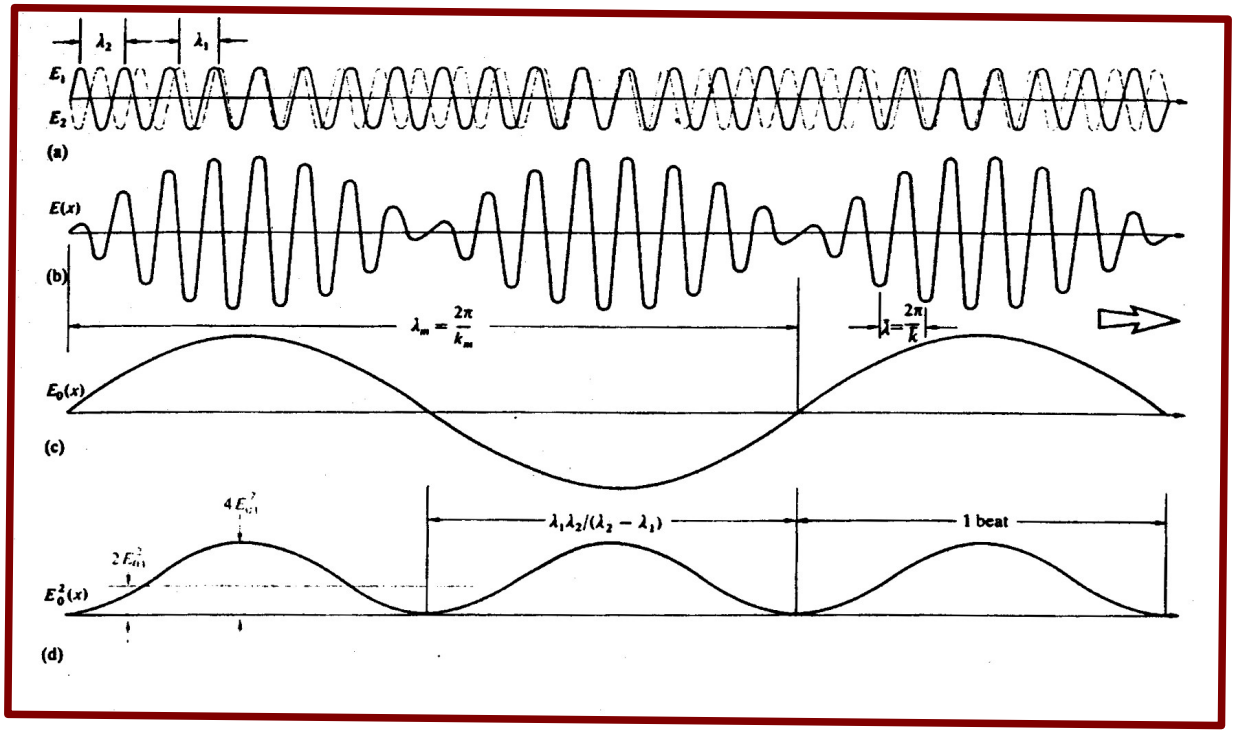
2 ondes : battement

Les deux ondes

Leur somme

Leur enveloppe

Intensité



Application :

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

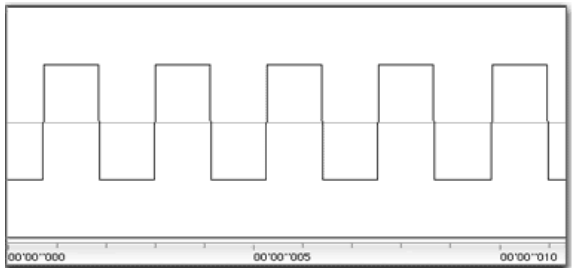
TIMBRE C'est la superposition d'ondes de fréquences différentes

Plusieurs ondes

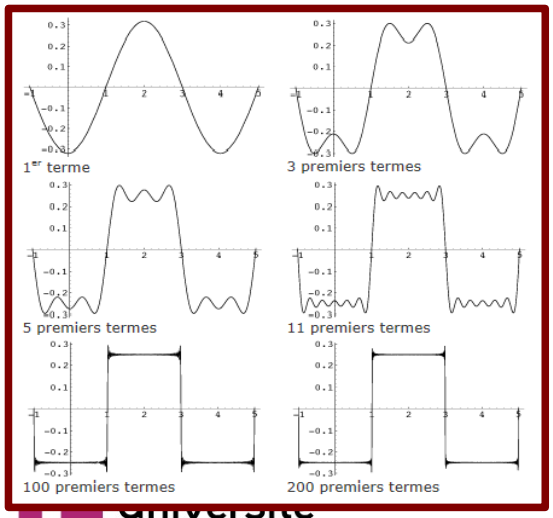
Théorème de Fourier :

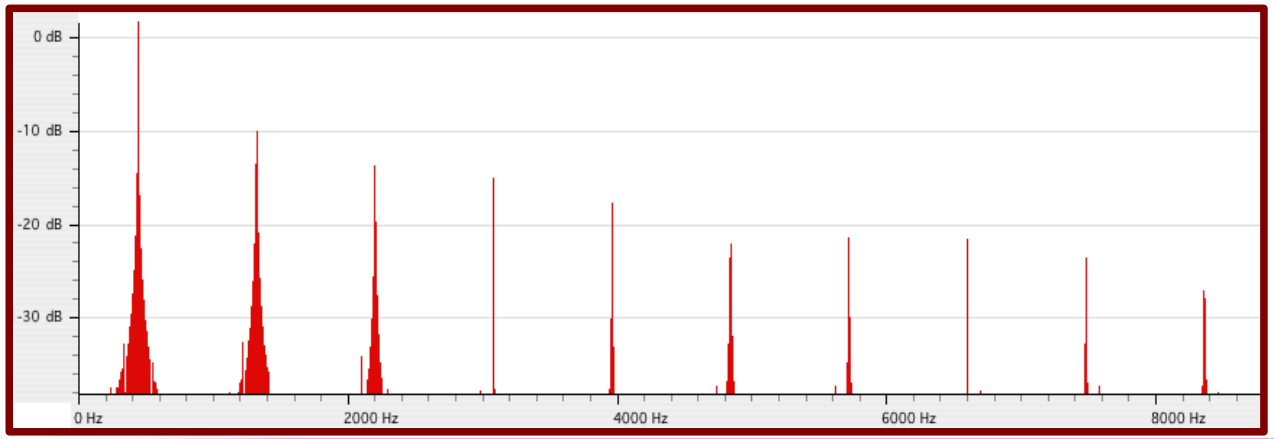
Tout signal périodique de fréquence f se décompose en une somme de sinusoïdes de fréquences f, 2f, 3f, 4f, …, appelées harmoniques.

$$F(t) = A_1 \sin(2\pi \boldsymbol{f}\, t) + A_2 \sin(2\pi \boldsymbol{2}\, \boldsymbol{f}\, t) + A_3 \sin(2\pi \boldsymbol{3}\, \boldsymbol{f}\, t) + A_4 \sin(2\pi \boldsymbol{4}\, \boldsymbol{f}\, t) + \ldots$$



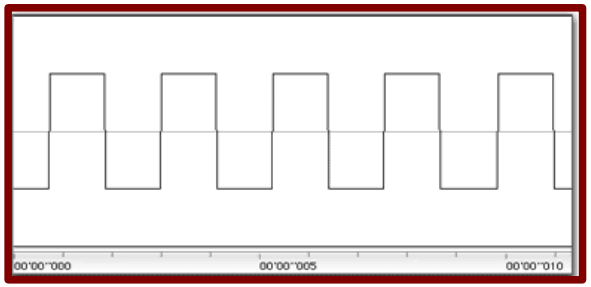
Créneau à 440 Hz

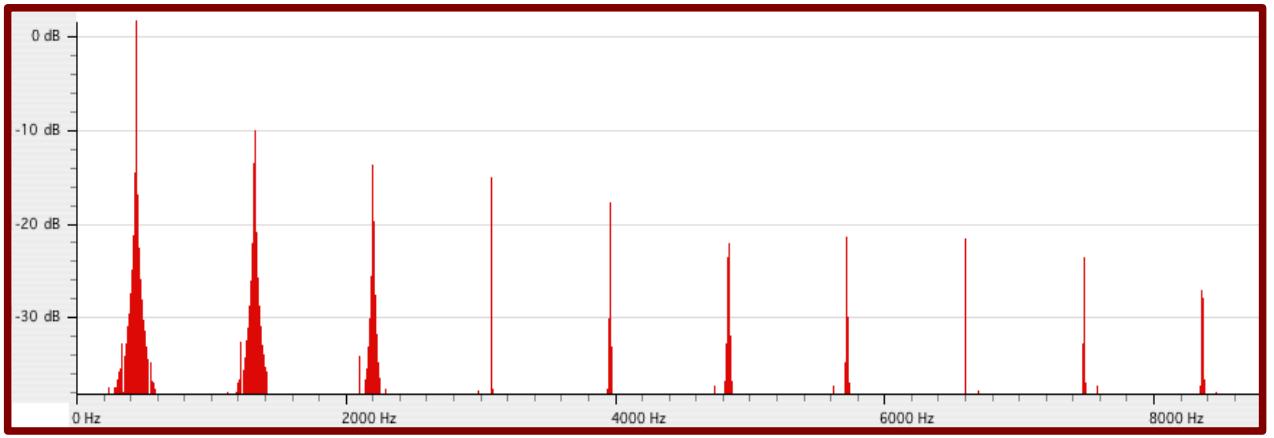




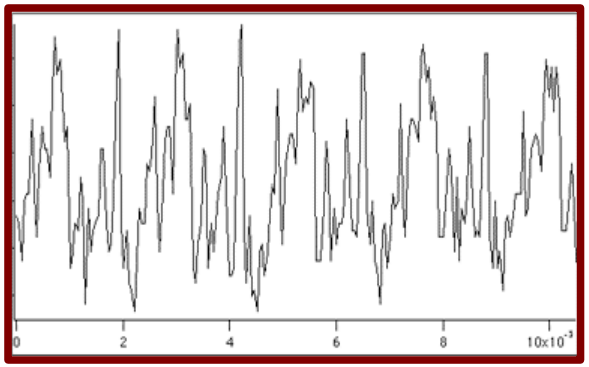
TIMBRE C'est la superposition d'ondes de fréquences différentes

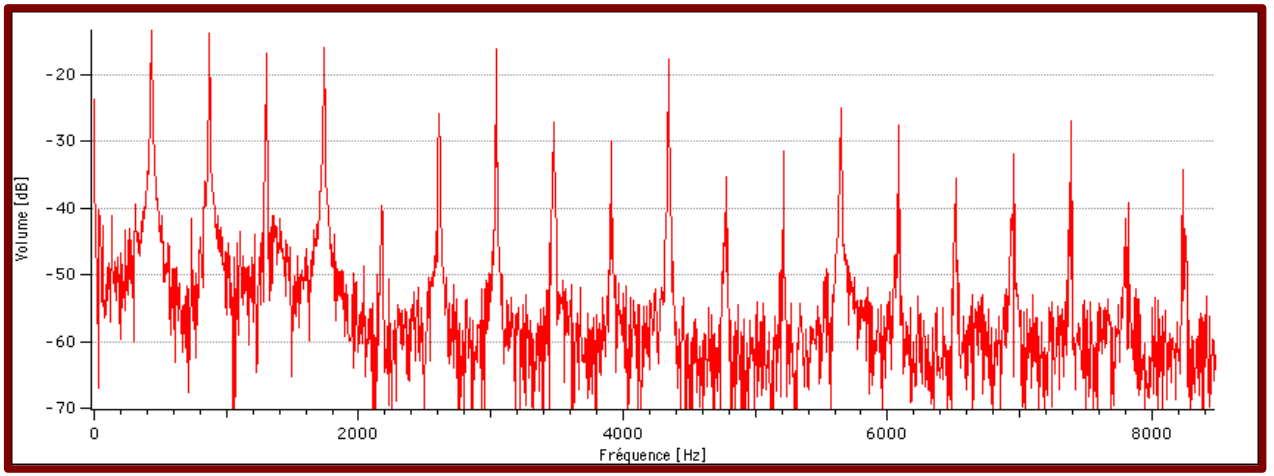
Plusieurs ondes



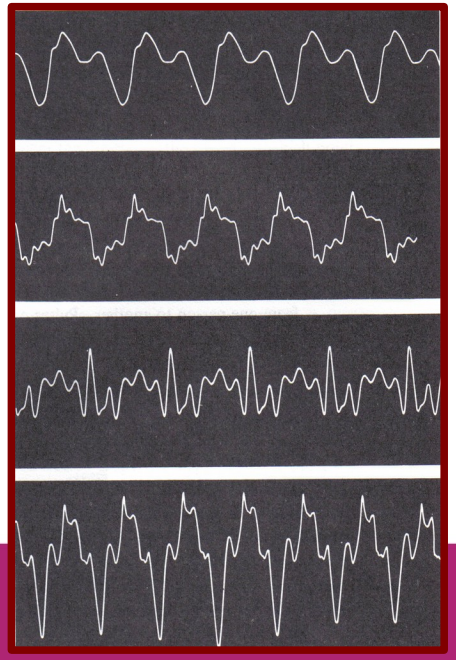


violon à 440 Hz





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 ($\times$ 2 – 1 octave)	20 - 20×10^{3} Hz ($\times$ 1000 – 10 octaves)
Analyse en fréquence (capacité à distinguer des ondes de fréquences voisines)	
Intégrateur	Grande discrimination



flute

clarinette

hautbois

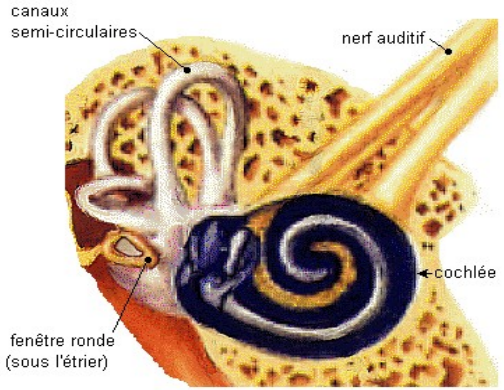
saxophone

3 – Découpage du monde sonore

gamme, octave, ton, …

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

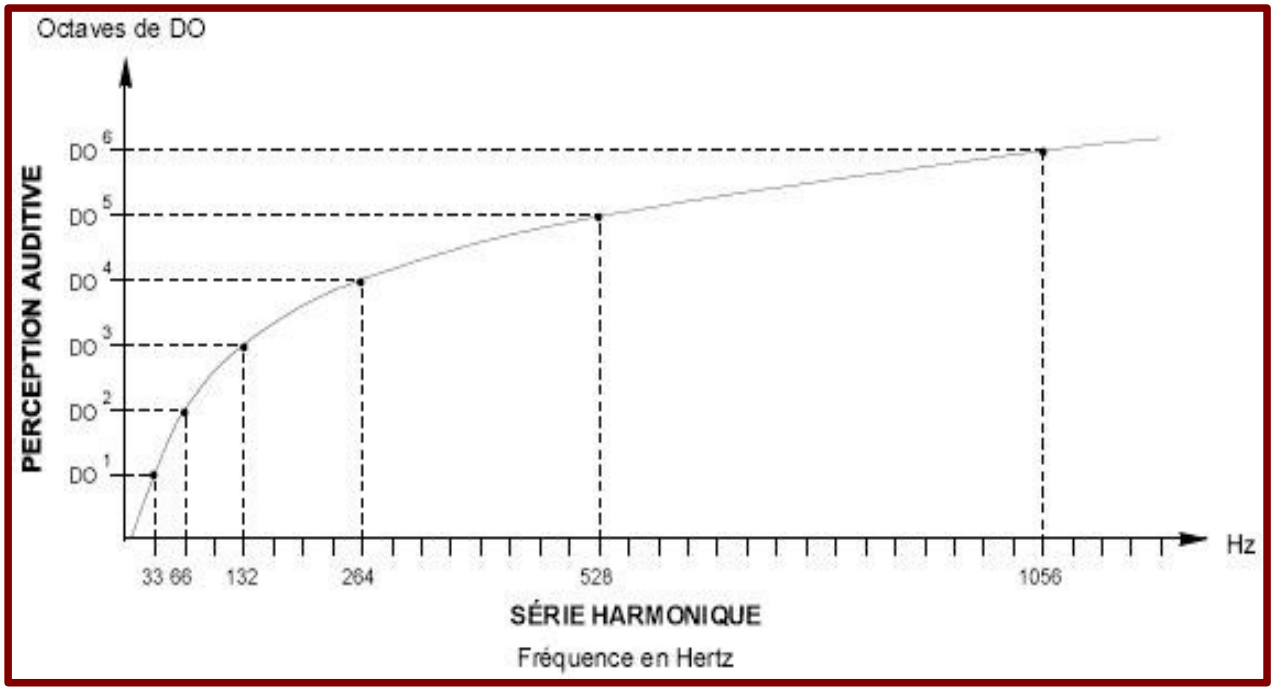
- Lorsque la fréquence est multipliée par 2, le cerveau reconnaît la similitude des termes paires de la série : $A_{2n} \sin(2\pi\, n f\, t)$: il donne le même nom au $2^{ème}$ son en précisant que l'un est plus grave que l'autre

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

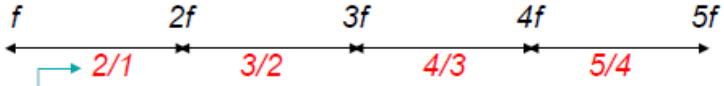
La perception auditive est logarithmique ...

- 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.



Cycle des quinte

Considérons les 5 premières harmoniques d'un son pur de fondamentale *f* .



Rapports de fréquences entre harmoniques consécutives

$u_0 = 1$

$u_1 = 1x(\frac{3}{2})^1 = \frac{3}{2}$

$u_2 = 1x(\frac{3}{2})^2 = \frac{9}{4}$, normalisée : $\frac{9}{4} /2^1 = \frac{9}{8}$

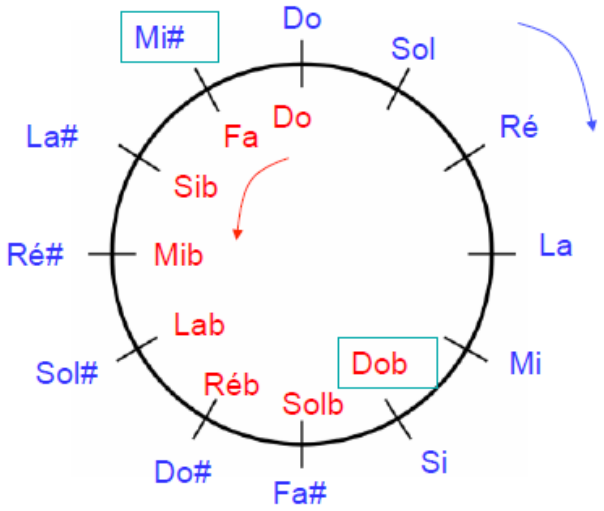
$u_3 = 1x(\frac{3}{2})^3 = \frac{27}{8}$, normalisée : $\frac{27}{8} /2^1 = \frac{27}{16}$

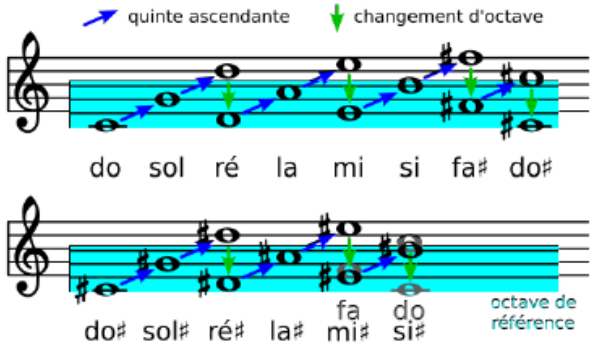
$u_4 = 1x(\frac{3}{2})^4 = \frac{81}{16}$, normalisée : $\frac{81}{16} /2^2 = \frac{81}{64}$

$u_5 = 1x(\frac{3}{2})^5 = \frac{243}{32}$, normalisée : $\frac{243}{32} /2^2 = \frac{243}{128}$

Cycle des quintes descendantes

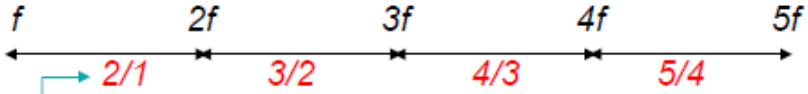
Cycle des quintes ascendantes





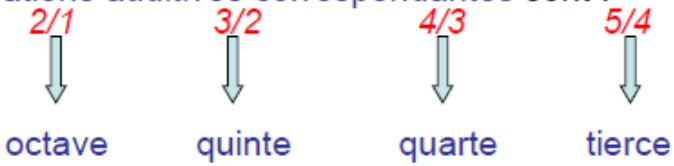
Jean VAILLANT - cours de L1
Musique et mathématiques

Considérons les 5 premières harmoniques d'un son pur de fondamentale *f* .

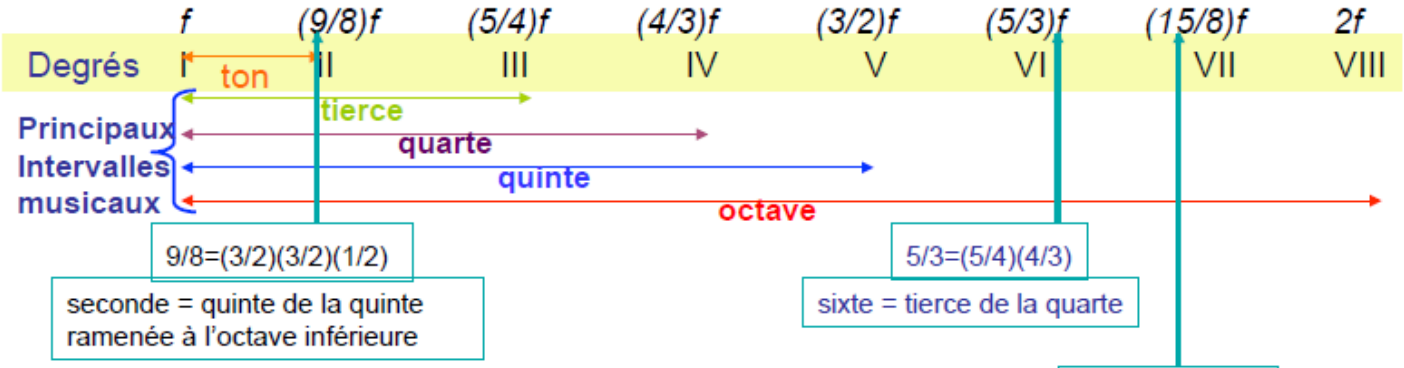


Rapports de fréquences entre harmoniques consécutives

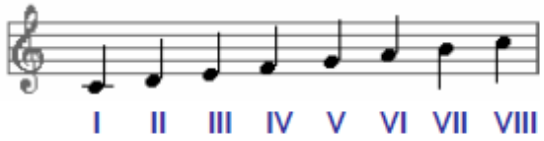
Les sensations auditives correspondantes sont :



Dans la musique occidentale, l'intervalle [*f*, *2f*] est divisé en 7 intervalles supposés correspondre à des notes agréables à l'oreille. En se basant sur les **harmoniques naturelles 2, 3 et 5**, on a :



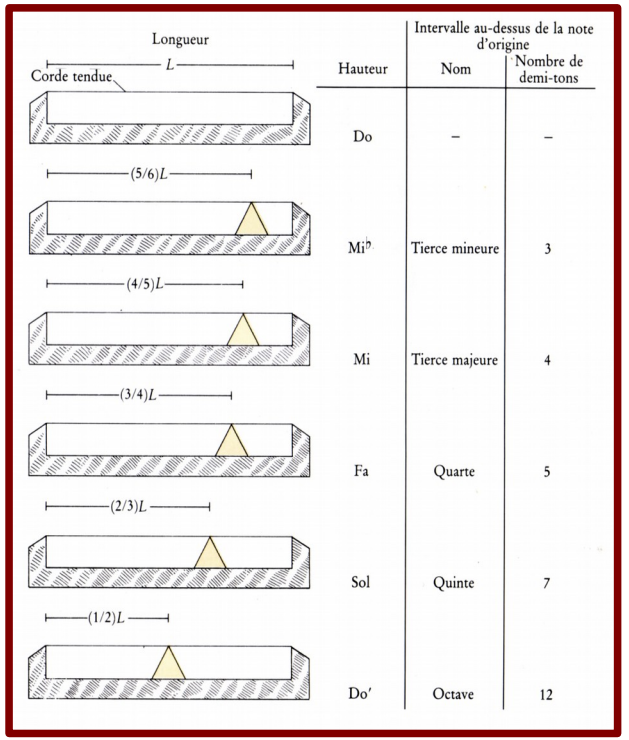
On a une **gamme** (succession de notes sur l'étendue d'une octave) **heptatonique** (à 7 degrés). Le système harmonique occidental est basé sur cette **gamme dite diatonique**.

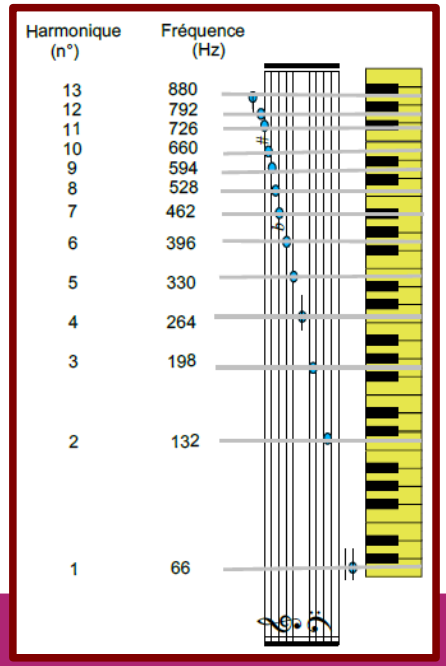


Harmonie = plaisir ...

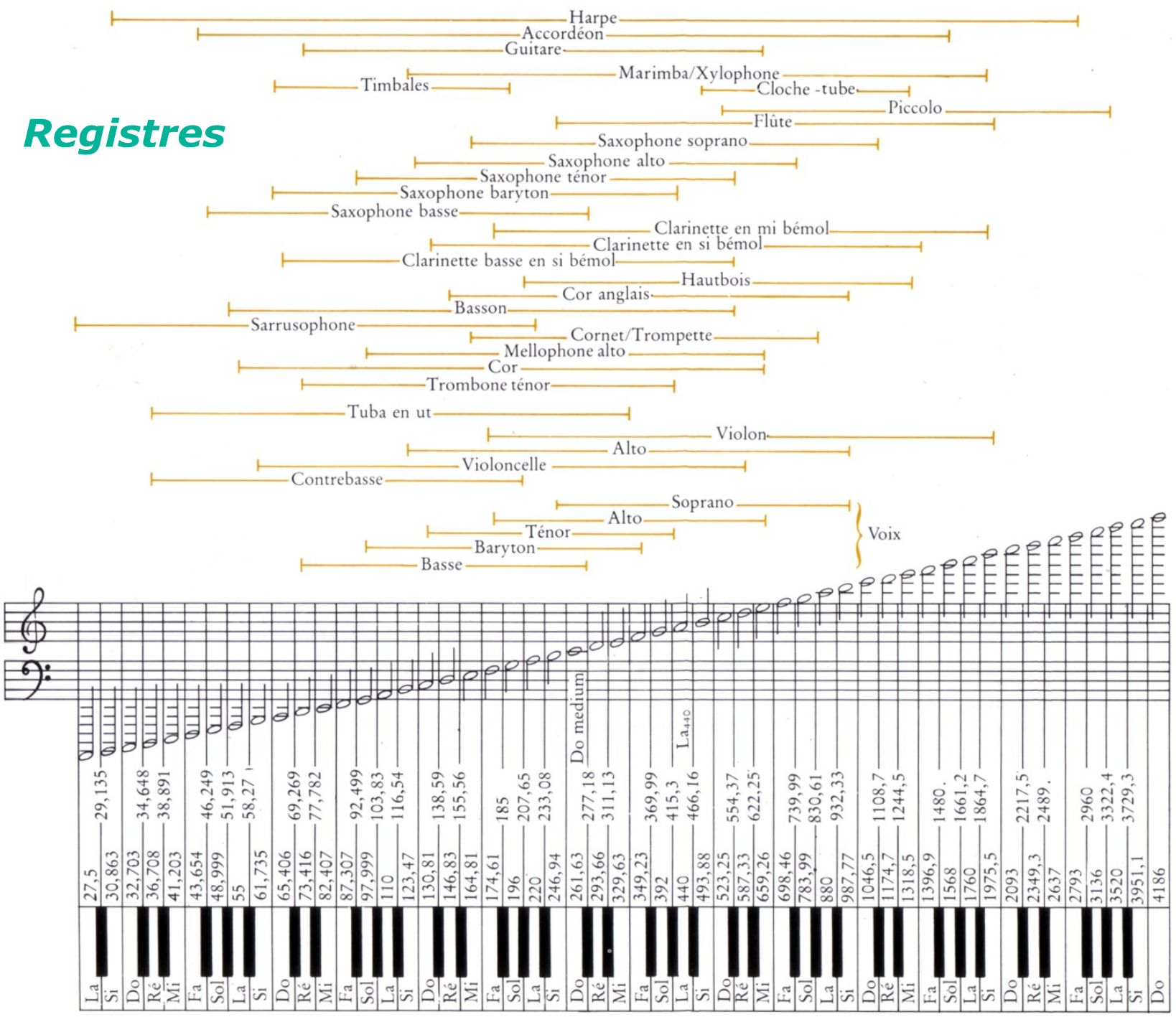
- Ce n'est pas la valeur numérique d'une fréquence qui compte, c''est l'intervalle (= « tons » ou « demi-tons ») entre les notes d'une même octave : si l'intervalle est harmonieux, il est conservé s'il est discordant, il est rejeté.
- 1ère explication scientifique par Pythagore (550 avant J.C.)
  - relation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





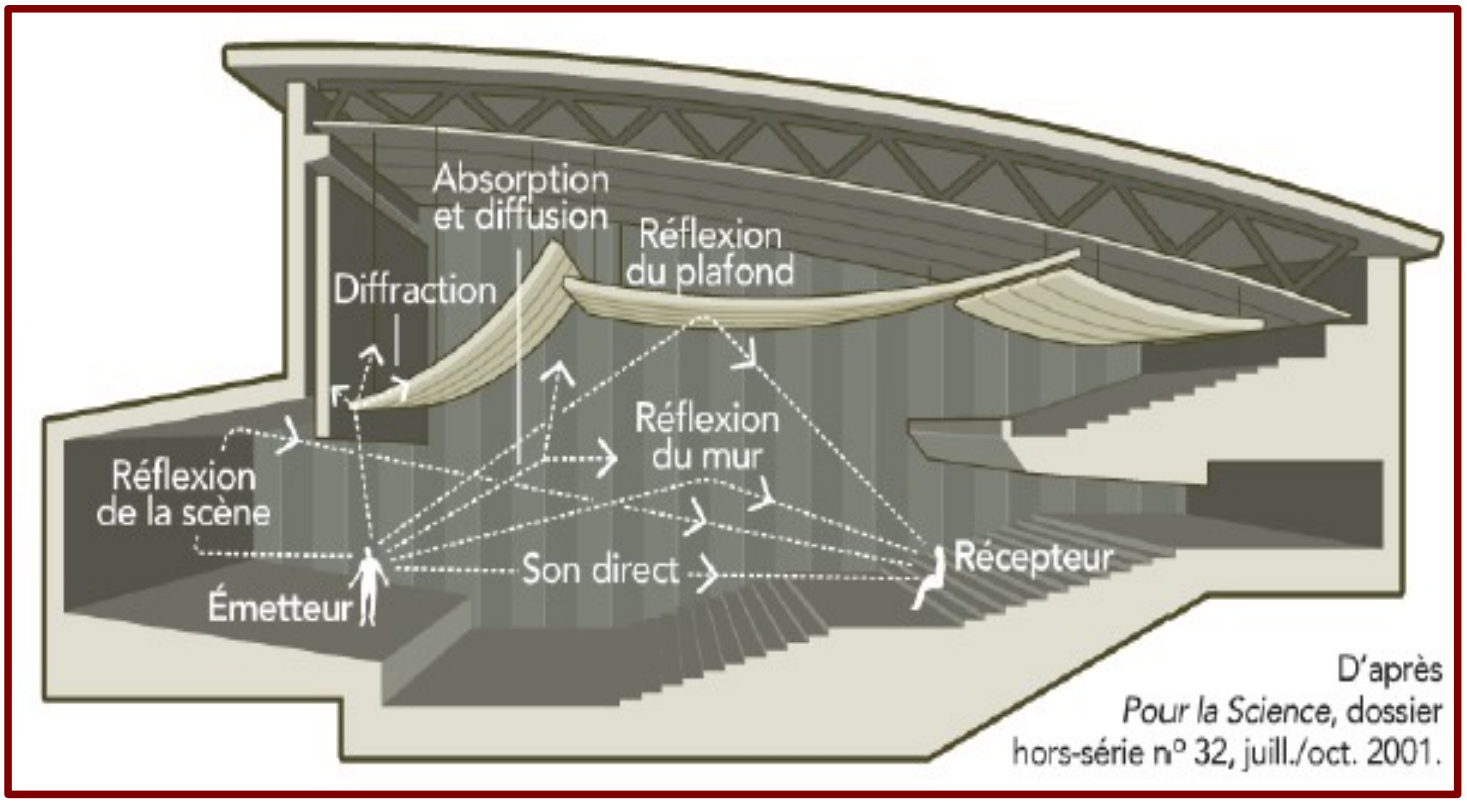
Registres

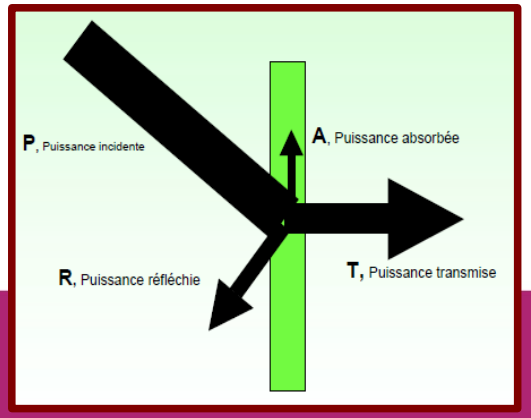

Harpe
Accordéon
Guitare
Marimba/Xylophone
Timbales
Cloche -tube
Piccolo
Flûte
Saxophone soprano
Saxophone alto
Saxophone ténor
Saxophone baryton
Saxophone basse
Clarinette en mi bémol
Clarinette en si bémol
Clarinette basse en si bémol
Hautbois
Cor anglais
Basson
Sarrusophone
Cornet/Trompette
Mellophone alto
Cor
Trombone ténor
Tuba en ut
Violon
Alto
Violoncelle
Contrebasse
Soprano
Alto
Ténor
Baryton
Basse
Voix
Do medium
La440
27,5 29,135 30,863
32,703 34,648 36,708 38,891 41,203
43,654 46,249 48,999 51,913 55 58,27 61,735
65,406 69,269 73,416 77,782 82,407
87,307 92,499 97,999 103,83 110 116,54 123,47
130,81 138,59 146,83 155,56 164,81
174,61 185 196 207,65 220 233,08 246,94
261,63 277,18 293,66 311,13 329,63
349,23 369,99 392 415,3 440 466,16 493,88
523,25 554,37 587,33 622,25 659,26
698,46 739,99 783,99 830,61 880 932,33 987,77
1046,5 1108,7 1174,7 1244,5 1318,5
1396,9 1480 1568 1661,2 1760 1864,7 1975,5
2093 2217,5 2349,3 2489 2637
2793 2960 3136 3322,4 3520 3729,3 3951,1 4186
La Si Do Ré Mi Fa Sol La Si Do Ré Mi Fa Sol La Si Do Ré Mi Fa Sol La Si Do Ré Mi Fa Sol La Si Do Ré Mi Fa Sol La Si Do Ré Mi Fa Sol La Si Do

4 – Acoustique architecturale

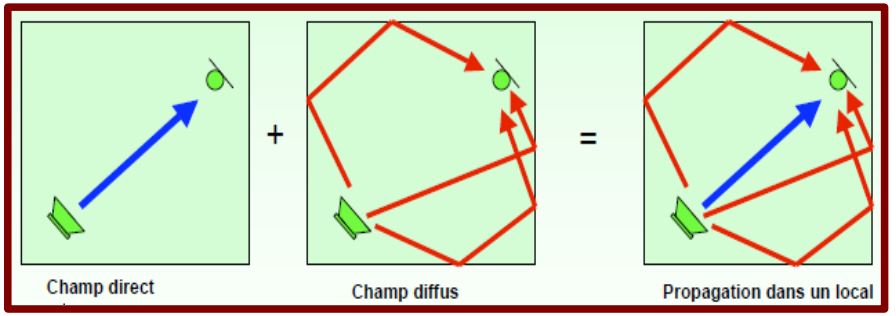
Interaction son – matière ?

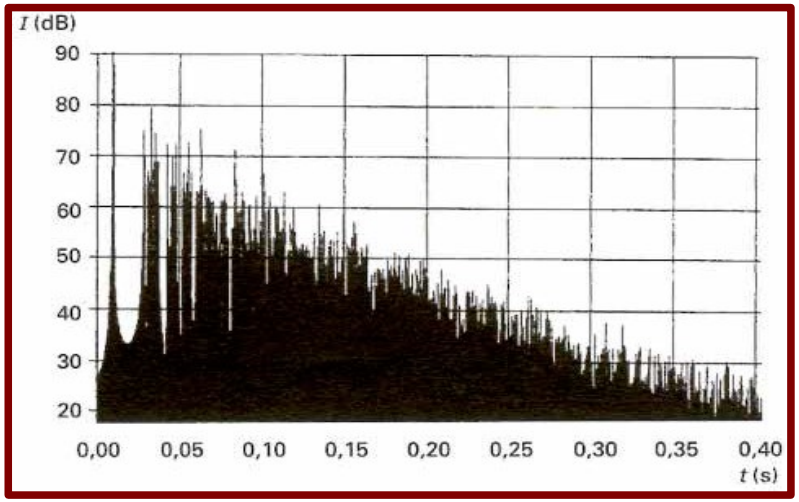
Acoustique des salles

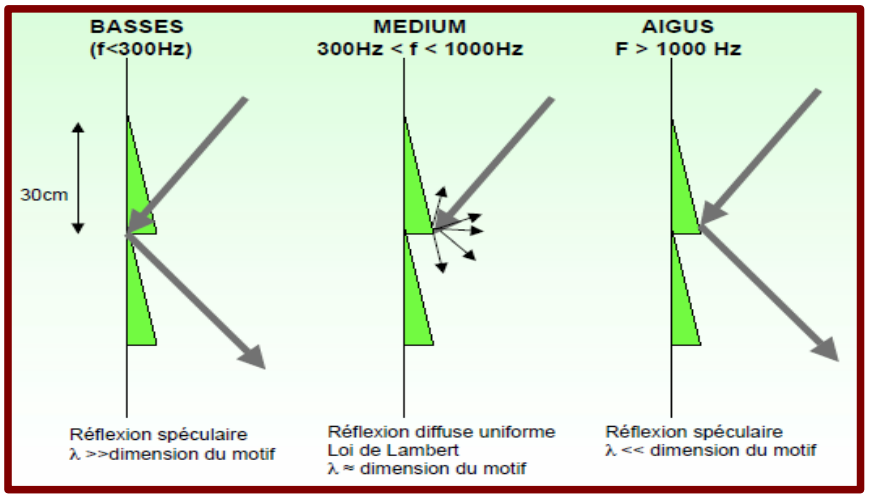


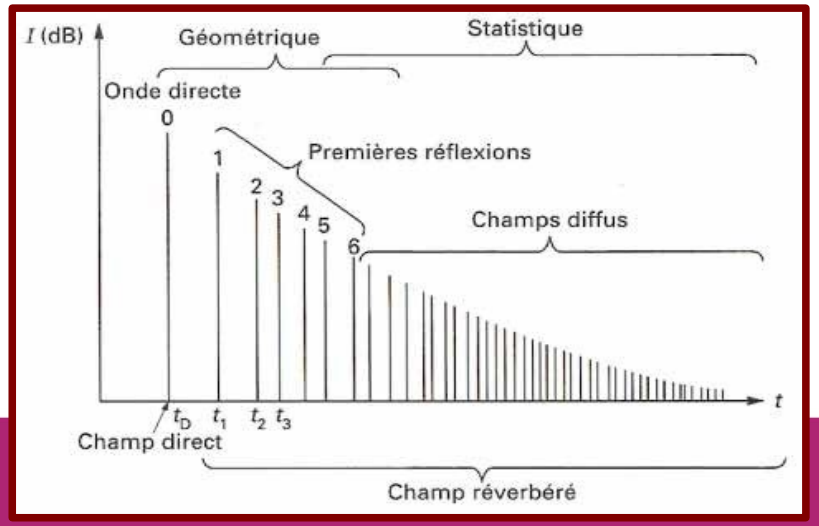


Réflexion


+
=
Champ direct
Champ diffus
Propagation dans un local


I (dB)
90
80
70
60
50
40
30
20
0,00
0,05
0,10
0,15
0,20
0,25
0,30
0,35
0,40
t (s)


BASSES
(f<300Hz)
MEDIUM
300Hz < f < 1000Hz
AIGUS
F > 1000 Hz
30cm
Réflexion spéculaire
λ >>dimension du motif
Réflexion diffuse uniforme
Loi de Lambert
λ ≈ dimension du motif
Réflexion spéculaire
λ << dimension du motif

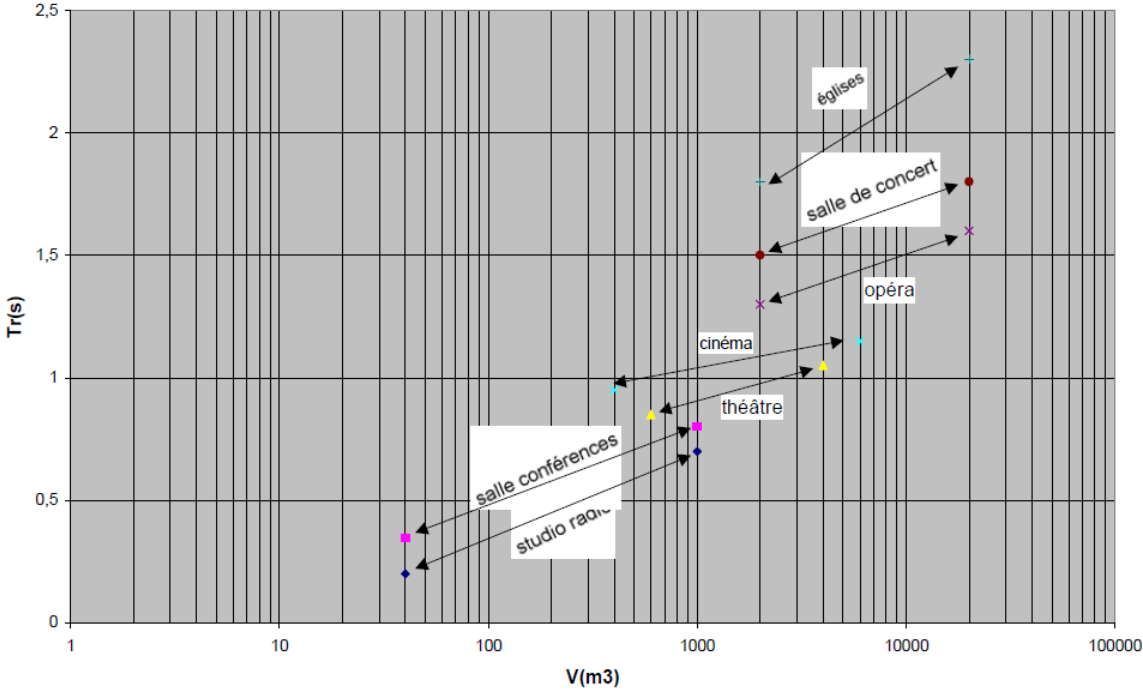

I (dB)
Géométrique
Statistique
Onde directe
0
1
2
3
4
5
6
Premières réflexions
Champs diffus
t
t_D t_1 t_2 t_3
Champ direct
Champ réverbéré

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. intensité 10^6 fois plus faible) après l'arrêt de la source

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



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

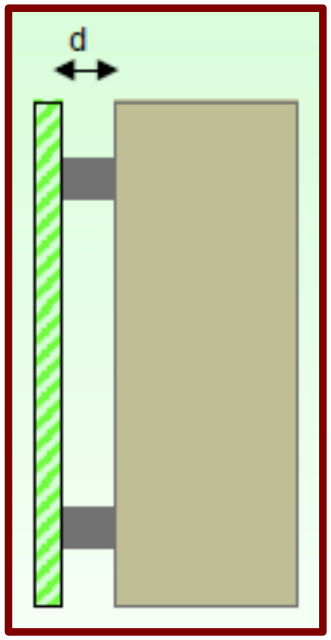
relatif à la limitation du bruit dans les établissements d'enseignement

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

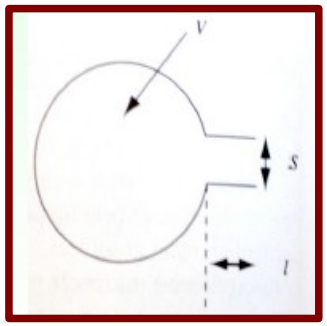
Graves
Panneaux fléchissants



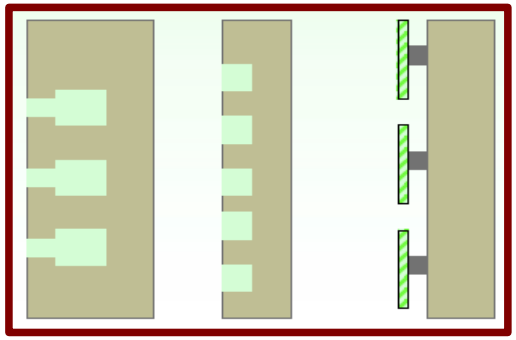
$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{\rho_s d}}$$

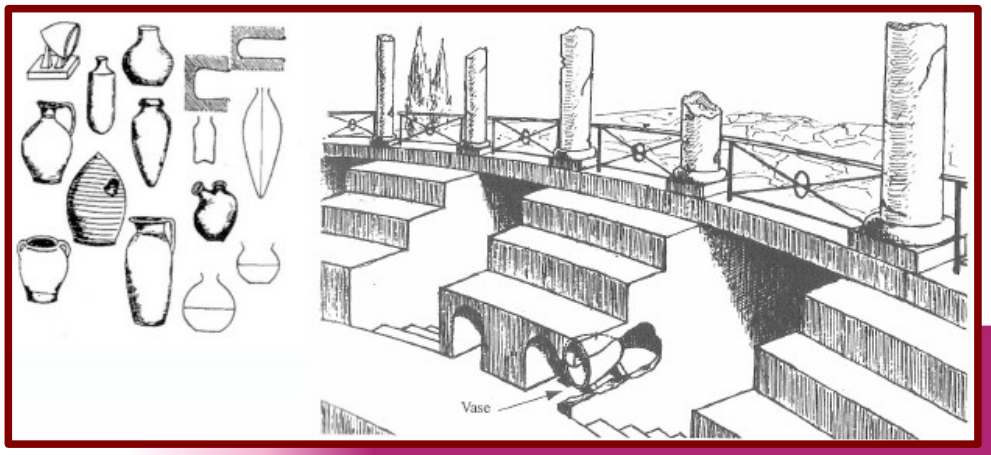
Contreplaqué
ρ_s= 5 kg/m^2 d = 8 cm
f_0 = 95 Hz

Médiums (500-2000 Hz)
Résonateurs

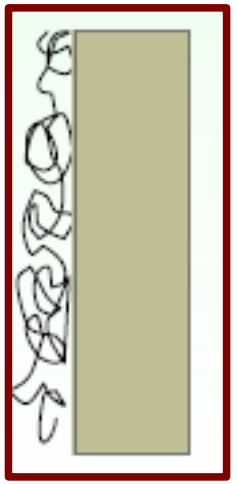


$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\gamma \frac{ps}{\rho l V}}$$





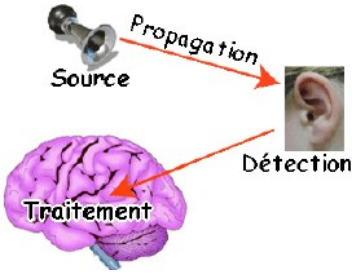
Aigus
Matériaux fibreux



Université de Lille

5 – Quelques digressions pour finir…

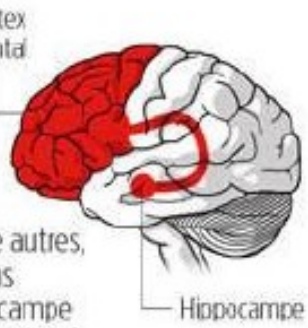
Musique et cerveau



Comment le cerveau « entend-il » la musique ?

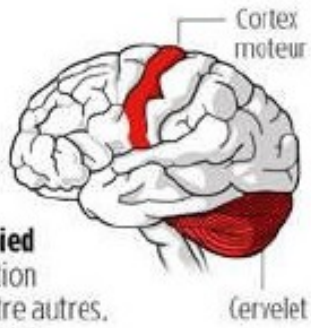
Comment elle stimule certaines zones du cerveau

LA MÉMOIRE



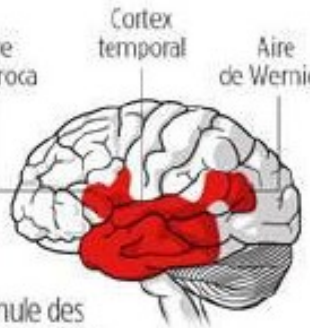
Un air familier active, entre autres, des régions impliquées dans la mémoire comme l'hippocampe et certaines aires du cortex frontal.

LA MOTRICITÉ



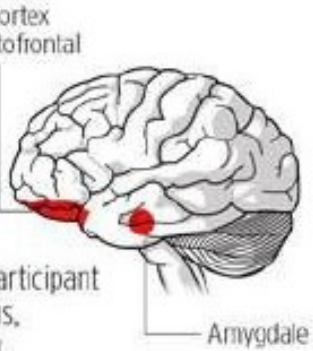
Battre la mesure avec le pied nécessite une synchronisation temporelle impliquant, entre autres, le cervelet et le cortex moteur.

LE LANGAGE



Ecouter de la musique stimule des régions du cerveau communes à celles du langage, telles les aires de Broca et de Wernicke, ainsi que certaines régions du cortex temporal.

LES ÉMOTIONS

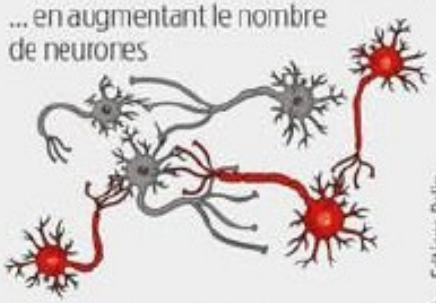


Elle active les structures participant au traitement des émotions, tels l'amygdale et le cortex orbitofrontal.

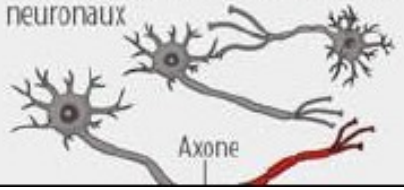
Elle favorise aussi la plasticité cérébrale...

... en augmentant le nombre de connexions synaptiques entre neurones.

... en augmentant le nombre de neurones



... en allongeant les prolongements neuronaux



Sources : « Le cerveau mélomane », Editions Belin.

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/PZl9obkgF58
Physique à main levée : Acoustique : https://www.youtube.com/playlist?list=PLD32868A967DFB89C
Le son • TDC N° 1046 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-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-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