A mes enfants : Aude, Sophie, Alix, Francis et Laurent

Acoustique pratique

Phénomènes acoustiques liés à l'oreille et à la musique sans notions d'électroacoustique

(Voir précis d'acoustique musicale = EMR 18393)

1) Les fonctions de l'oreille
2) Réflexion du son
3) Interférences
4) Renforcement des sons (résonance)
5) La modulation du son : $S = I \sin (2 \square f t + \square)$
6) Le métronome à balancier
7) Résonance entre deux pendules identiques (fréquences basses ou infrasons)
8) Le pendule simple libre ou soumis à un excitateur
9) Harmoniques : pendules et cordes ; le timbre
10) Le son est une vibration
11) la table d'harmonie, battements
12) La caisse de résonnance
13) Effet Doppler : comment mesurer la vitesse de déplacement d'une sirène à l'oreille
14) Le phénomène d'écho
15) Accord d'une corde de piano
16) Accord de la guitare
17) Instruments à vent
18) Cordes et tuyaux : fréquences propres
19) Image de la propagation du son
20) Caractéristiques de l'instrument de musique
21) Comment mesurer la vitesse du son
22) La durée d'un son peut mesurer une longueur
23) Deux sons peuvent mesurer la température
24) Moyenne harmonique : analogies avec les accords musicaux
25) Acoustique architecturale
26) Rappel des gammes sur corde
27) La mesure des différences sonores afin d'apprécier le niveau d'intensité
28) Photos

Rappel : en musique la fréquence donne la note

1) Les fonctions de l’oreille :

L’oreille externe capte et transmet le son jusqu’au tympan (fonctionnement identique à un micro)

l’oreille moyenne transmet chaque vibration du tympan à l’oreille interne

l’oreille interne possède les récepteurs de l’audition et transforme les vibrations en influx nerveux

➔ test des fonctionnalités de l’oreille moyenne à l’aide d’un diapason à fourche

pour frapper un diapason, il faut le tenir du coté de la boule sans toucher la fourche et frapper une seule branche (ou lame) et pour l’arrêter il faut tenir les deux branches

➔ **Expérience de Rinne**

En tenant un diapason, après l’avoir frappé, la boule sur l’os du crane derrière l’oreille, on perçoit le son par la conduction osseuse

Quand la perception du son cesse, on peut l’entendre à nouveau sans refrapper le diapason, si on tient la fourche devant l’oreille, la conduction aérienne étant plus efficace pour une personne qui ne soufre pas de troubles auditifs.

➔ **Expérience de Weber**

Si on appuie le diapason sur le milieu du front (après l’avoir frappé) on entend bien le son dans les deux oreilles quand on ne souffre pas de troubles auditifs

Quand une des deux oreilles moyennes a un dysfonctionnement, on entend mieux le son dans l’oreille malade, car le son rejoint directement l’oreille interne à travers le crane sans passer par l’oreille moyenne

Une oreille moyenne avec un défaut empêche le son d’entrer et aussi d’en sortir. L’oreille interne est devenue plus sensible aux sons faibles à cause du dysfonctionnement de l’oreille moyenne

Principales propriétés de l’oreille humaine

Pour tout niveau sonore, la faculté d’entendre dépend de trois facteurs : le nerf acoustique, la constitution même de l’oreille et la résonance qui se produit dans le conduit auditif. Cette résonance, chez l’homme, est à une fréquence naturelle d’environ 3500 Hz, notre oreille est particulièrement sensible aux niveaux sonores allant de 2000 à 5000Hz. Ces fréquences sont pour la plupart celles des équipements automatisés, comme les imprimantes ou les machines de traitement de texte. Enregistrées par notre oreille, les ondes sonores, se transforment en énergie électrique, puis cette énergie est elle-même captée par la zone du cerveau qui a l’ouïe comme interface

Les propriétés de l’oreille sont :
- insensibilité à la pression barométrique (équilibrage des pressions par la trompe d’Eustache). C’est ce qui permet à l’oreille de fonctionner normalement dans une large gamme de pressions barométriques (~ 0,1 à 10 bar).
- Possibilité (avec un entraînement) de mesurer les fréquences des principales composantes d’un son dans la gamme 100 – 4000 Hz.
- Impossibilité de discerner deux sons de polarités opposées et, plus généralement, insensibilité aux phases des composantes d’un son.
- Une oreille saine peut capter des sons situés entre 20 et 20000 Hz, ce qui représente quelque 300000 sons différents.

A la fréquence 1000 Hz le seul d'audibilité se situe à 0,2 nano bar efficace (2 x 10^{-5} N/m²). Tel est le niveau zéro conventionnel de l'échelle logarithmique (0 dB) des pressions acoustiques, ainsi que de l'échelle des phones.
→ sensation physiologique d'intensité : courbes de Fetcher et Munson ; ex de sonométrie :
60 phones sont obtenus par un son de 200 nano bars efficaces à 1000 Hz ou un son de 2000 nano bars efficaces à 45 Hz).
20 phones sont obtenus par un son de 60 dB à 50 Hz ou un son de 80 dB à 4000 Hz

Dans la gamme de fréquence où l'oreille est le plus sensible, les flux de puissance correspondant au seuil sont très faibles, de l'ordre de 10^{-12} watt / m².
En considérant que l'oreille a une surface de captation d'environ 1cm², on peut écrire :
Ps = (pa efficace)² / □ c = 10^{-12} watt / m²
Soit une puissance recueillie de $10^{-12} * 10^{-4} = 10^{-16}$ watt alors que la puissance du bruit thermique dans une bande de 3000 Hz est d'environ 10^{-17} watt à la température ambiante. L'oreille constitue donc un appareil très sensible.

Les applications possibles :

- téléphonie civile : 300 – 3400 Hz

les voyelles sont correctement restituées mais non les consonnes qui sont devinées par l'auditeur.

- radiodiffusion ordinaire : 100 – 4000 Hz

amputation des fréquences basses et des partiels les plus élevés des sons aigus.

- radiodiffusion de haute qualité : 40 – 15000 Hz

sous réserve de linéarité en amplitude, de la faiblesse du bruit, …

les êtres vivants ont un seuil d'audibilité qui varie avec l'espèce
éléphant : 10 kHz
homme : 20 kHz
chien : 40 kHz
chauve-souris : 120 kHz
dauphin : 200 kHz

.

Pourquoi on n'entend plus le son au bout d'un certain temps ?
Dans une salle, les ondes se réfléchissent environ 200 fois sur les murs
A chaque réflexion, l'énergie des ondes sonores se transforme progressivement en énergie thermique et devient nulle

2) réflexion du son

➔ **Transmission du son par réflexions successives**

Dans un stéthoscope le son se réfléchit dans le tube jusqu'aux oreilles

➔ En mettant la tête sous l'eau, on s'aperçoit que l'on n'entend plus les sons de la berge alors qu'on entend avec plus d'intensité les sons produits dans l'eau. Il y a réflexion du son produit sur le rivage au niveau de la surface de l'eau (eau et air ont des caractéristiques acoustiques différentes)

➔ Une porte en bois atténue le son car la plus grande partie de l'onde sonore est réfléchie et la partie transmise se fait avec un angle de réfraction important (le bois conduit le son beaucoup plus vite que l'air : 4000 m/s au lieu de 340 m/s)

➔ Passage du son de l'eau à l'air

- Mettre un verre dans une grande cuvette remplie d'eau
  Taper sur le verre avec une cuiller : le son parait faible car il se réfléchit en grande partie à la surface de l'eau
- Tremper une oreille dans l'eau et boucher l'autre oreille
  Si on tape sur le verre avec une cuiller le son va être beaucoup plus fort (l'eau conduit mieux le son que l'air)

3) interférences

Interférence des ondes directes :
A la surface de l'eau, les ondulations issues de deux sources A et B se propagent chacune d'une façon indépendante. Cependant, aux points où elles se croisent, la hauteur de l'élévation ou le creux de la dépression sont égaux à la somme algébrique des deux amplitudes : il y aura donc des points Q où les ondulations seront au maximum ou minimum soit des interférences.
Nous aurons un maximum lorsque QB – QA = 2 k □ / 2
K = 1, 2, 3, 4, …
Et un minimum pour QB – QA = (2 k +1) □ / 2
Avec k = 0, 1, 2, 3, 4, …

Interférence des ondes réfléchies :
Les ondes directes et réfléchies sont de signes contraires
Au point H distant de D du point de réflexion
Le son est renforcé si 2 D = (2k +1) □ / 2
Avec k = 0, 1, 2, 3, 4, …
Le son affaibli si 2 D = 2k □ / 2
Avec k = 1, 2, 3, 4, …

➔ **Ecoute des interférences sonores:** avec un diapason à fourche que l'on tourne verticalement sur lui-même près de l'oreille (superposition de fréquences identiques déphasées)

4) Renforcement des sons (résonance)

➔ **En faisant vibrer un diapason devant l'orifice d'une éprouvette en verre (ou vase droit) assez haute et d'abord vide, le son ne paraît pas sensiblement renforcé.**

Si on verse un peu d'eau dans l'éprouvette , de manière à diminuer la hauteur de la colonne d'air, il arrivera un moment ou le son du diapason éprouve un renforcement considérable, lequel cesse presque aussitôt, si l'on continue à verser de l'eau. (autre variante en utilisant le principe des vases communiquant : verser de l'eau dans un bocal, dans lequel on a plongé un tube ouvert aux deux extrémités)

Si on mesure la longueur de la colonne d'air au moment ou le renforcement se produit, on constate que cette longueur est précisément celle d'un tuyau fermé qui donnerait la même note que le diapason

Fréquence du diapason $f = 440$ Hz

vitesse du son à 15° C : $c = 340$ m / s

Longueur d'onde $\lambda = c / f = 340 / 440 = 0,7727$ m

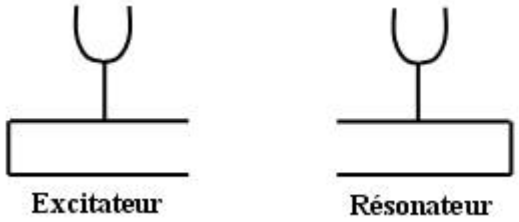
Longueur prévue de la colonne d'air $L = \lambda / 4 = 0,1931$ m

Si on fait l'expérience avec un tuyau ouvert aux deux extrémités :

La longueur de la colonne d'air doit être de

$L = \lambda / 2 = 0,3864$ m

➔ Propagation entre deux cavités résonnantes identiques



Les deux diapasons sont identiques et les cavités ont une longueur de $\lambda /4$

avec λ = vitesse du son dans l'air / fréquence du diapason

En percutant l'excitateur et en étouffant les oscillations le son continue sur le résonateur

➔ Si on fixe une petite masse (pate à modeler, cire, argile, cavalier en plastic mais éviter le métal pour ne pas blesser le diapason) sur une tige d'un des diapasons, la fréquence de celui-ci va baisser et il y aura un phénomène de battement, ce qui fait que le son ne sera plus prolongé faute de résonance

➔ En plongeant un tube ouvert aux deux extrémités dans un seau d'eau et en utilisant un sifflet au dessus de la partie ouverte on peut déterminer sa fréquence f. Il y aura résonance quand la longueur du tube L soumise à l'air va amplifier le son au maximum

$L = \lambda / 4 \rightarrow \lambda = 4 L$ λ : longueur d'onde

f = vitesse du son dans l'air (340 m/s) / λ

➔ Devant un piano dont on a écarté les étouffoirs, il suffit d'émettre une note quelconque avec un violon ou avec la voix pour qu'aussitôt les diverses cordes du piano qui correspondent à cette note et à ses harmoniques se mettent à résonner (on peut faire la même chose avec les tuyaux d'orgue)

➔ Expérience : la fourchette qui sonne

- Attacher une fourchette au milieu d'un fil d'un mètre de longueur
- Faire une boucle à chaque bout du fil pour pouvoir passer le petit doigt de chaque main
- Mettre les petits doigts dans les deux boucles et dans les deux oreilles
- Laisser pendre le fil et la fourchette sans qu'ils ne touchent un objet
- Taper la fourchette contre un objet dur (table, chaise, …)
- On entend le son d'une cloche
- Explication : les vibrations de la fourchette sont canalisées par le fil et les deux petits doigts, le son est renforcé

➔ Pour étudier les résonances d'un instrument de musique:
Prendre un tube de verre fin (diamètre environ 0,5 cm) et appuyer une extrémité sur la table d'harmonie avec la main gauche
Avec la main droite: mouiller son pouce et son index et tenir le haut du tube en glissant vers le bas. Les vibrations sont transmises à la table d'harmonie qui va répondre

5) la modulation du son : **S = I sin (2 □ f t + □)**

Le son peut être modulé dans le temps suivant 3 paramètres :

- l'intensité I (trémolo)
- la fréquence f (vibrato)
- la phase □ (électroacoustique, stéréophonie)

Analogies avec les ondes hertziennes (radio, télévision)

6) Le métronome à balancier

le métronome est un oscillateur harmonique

➔ **Nous disposons de deux pendules de longueur différentes. La période d'oscillation de l'un deux est connue. Quel peut être le moyen le plus simple pour déterminer la période de l'autre pendule ?**

La période exprimée en secondes est le temps d'un aller et retour complet à la même position

Un pendule est un oscillateur harmonique de période $T = 2 □ (L/g)^{1/2}$ pour des oscillations de faible amplitude

2□ radians = 360° □ = 3,14

L : longueur du pendule en mètres (point de suspension au centre de gravité du poids)

g : accélération de la pesanteur = 9,81 mètres/seconde ²

Il faut suspendre les deux pendules l'un près de l'autre pour qu'on puisse les observer ensemble. Tirer les deux poids du même côté et lâcher les simultanément. A l'instant initial les phases des oscillations coïncideront, mais avec le temps le pendule à période plus petite « devancera » l'autre pendule.

Un peu plus tard, les pendules reprendront de nouveau leur état « en phase ».
Il est évident que si à ce moment le premier pendule effectue n oscillations, le second en fera une de moins pour le même temps. On peut donc écrire :

$nT_1 = (n – 1)T_2$ où T_1 et T_2 sont les périodes du premier et du second pendule.

L'expression obtenue montre qu'en connaissant la période de l'un des pendules ainsi que n (compté pendant l'expérience) on peut trouver la période du deuxième pendule :

$T_2 = nT_1 / (n - 1)$ avec $T_2 > T_1$

La fréquence exprimée en hertz est l'inverse de la période : $f = 1/T$ $f_2 < f_1$

La fréquence f des battements entre les deux pendules est :

$f = f_1 - f_2$

$f = (1 / T_1) - 1 / [nT_1 / (n - 1)]$

$f = 1 / n T_1$

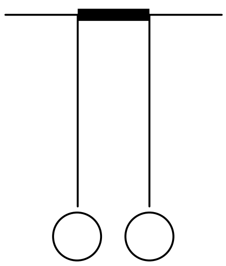
Le battement permet d'accorder une fréquence par rapport à une autre connue, sur un instrument de musique.

➔ **Expérience avec 2 métronomes mécaniques à balancier**
Sur une planche libre dans ses mouvements (sur roulettes mobiles par exemple)
Réglés sur une même valeur de battement par minute
Lancés en déphasage l'un par rapport à l'autre
Au bout d'un moment les deux métronomes se retrouvent en phase

7) Résonance entre deux pendules identiques (fréquences basses ou infrasons) Analogie avec deux cordes sympathiques

➔ Deux pendules identiques, de même longueur et de même masse sont suspendus à une tige rigide horizontale qui elle-même est reliée à deux points fixes par deux fils très fins

Fil tige fil



1 2

1 - on lance le pendule 1

2 - le pendule 2 réagit et commence à osciller

3 - le pendule 2 oscille avec la même période et la même amplitude que le pendule 1 mais en opposition de phase (le pendule 2 s’oppose à la cause qui lui a donné naissance)

4 - le pendule 1 diminue l’amplitude de ses oscillations

5 - le pendule 1 arête ses oscillations

6 - le pendule 1 réagit et recommence à osciller

7 – le pendule 1 oscille avec la même période et la même amplitude que le pendule 2 mais en opposition de phase

8 - le pendule 2 diminue l’amplitude de ses oscillations

Ainsi de suite, l’échange se poursuit entre les deux pendules avec amortissement des amplitudes

8) le pendule simple libre ou soumis à un excitateur (analogie avec un instrument de musique)

➔ Système oscillant composé d’un petit solide de masse m suspendu à un fil de longueur L et de masse négligeable
Ecarté de sa position d’équilibre avec un apport d’énergie initial, le pendule oscille avec une période propre :
$T = 2 \pi (L / g)^{1/2}$

pour de faibles amplitudes d’oscillation (θ < 15 °), la période ne dépend pas de l’amplitude (isochronisme des oscillations)

Au maximum d'amplitude, sa vitesse est nulle (énergie cinétique nulle), l'énergie potentielle E_P accumulée est de : $E_P = P\ h$

poids de la masse m → $P = mg$

différence d'altitude prise par m → $h = L - L \cos \theta$

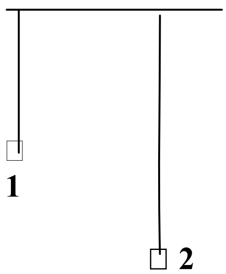
$E_P = mg\ L\ (1 - \cos \theta)$ où θ est l'amplitude angulaire

Si le pendule est idéal (pas de frottement), pendant qu'il oscille il y a conservation permanente entre son énergie cinétique et son énergie potentielle, de telle sorte que la somme des deux est constante

$1/2\ m\ v^2 + mg\ L\ (1 - \cos \theta) = \text{constante}$

Le pendule simple libre est analogue à un diapason (pas d'harmoniques)

- Un pendule simple (1) peut être mis en mouvement par les oscillations d'un autre pendule (2) avec lequel il est couplé. On dit alors que l'oscillateur est en « régime forcé »
  Les instruments de musique ne marchent pas en « régime forcé » (pas de couplage)



1 : pendule résonateur de longueur L_0, de masse m_0 et de période T_0

2 : pendule excitateur de longueur L, de masse m et de période T

Le résonateur oscille avec la fréquence imposée par l'excitateur. L'amplitude de ses oscillations dépend de la valeur de la fréquence imposée

Plus la fréquence de l'excitateur se rapproche de la fréquence propre du résonateur, plus l'amplitude des oscillations du résonateur devient grande (courbe en cloche qui caractérise le phénomène de résonance).

Quand $f = f_0$ (ou $T = T_0$) la puissance transmise par l'excitateur au résonateur est maximale (le pendule 1 aura une amplitude maximum A_{max} -- l'accroissement de l'amortissement entraîne la baisse de A_{max})

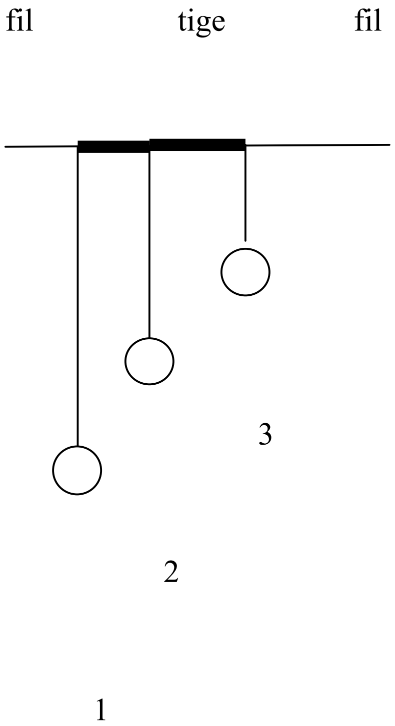
Facteur de qualité Q : caractérise l'acuité de la résonance de tout système oscillant

Un système oscillant possède une fréquence de résonance f_0 et une largeur de bande passante Δf (coupure à – 3 dB ou $A_{max} / 2^{1/2}$)

$Q = f_0 / \Delta f$ Plus le facteur de qualité est grand plus le système est sélectif

9) Harmoniques : pendules et cordes ; le timbre
Analogie avec une corde qui vibre

Trois pendules, de même masse sont suspendus à une tige rigide horizontale qui elle-même est reliée à deux points fixes par deux fils très fins



$T = 2 \times 3{,}14\ (L/g)^{1/2} = 2{,}00606668 \times L^{1/2}$

	do1	do1 #	ré	ré #	mi	fa	fa #	sol	sol #	la	la #	si	do2	do3	do4
f	**1**	**1,059**	**1,122**	**1,189**	**1,259**	**1,334**	**1,414**	**1,498**	**1,587**	**1,681**	**1,781**	**1,887**	**2,000**	**3,000**	**4,000**
$L=90/f^2$	**90**	**80,18**	**71,43**	**63,64**	**56,70**	**50,51**	**45,00**	**40,09**	**35,72**	**31,82**	**28,35**	**25,26**	**22,50**	**10,00**	**5,625**
T	**1,903**	**1,796**	**1,695**	**1,600**	**1,510**	**1,426**	**1,346**	**1,270**	**1,199**	**1,132**	**1,068**	**1,008**	**0,952**	**0,634**	**0,476**
f=1/T	**0,525**	**0,557**	**0,590**	**0,625**	**0,662**	**0,701**	**0,743**	**0,787**	**0,834**	**0,884**	**0,936**	**0,992**	**1,051**	**1,576**	**2,102**

Fondamentale L1 = 90 cm (harmonique 1)

Harmonique 2 L2 = 22,5 cm Harmonique 3 L3 = 10 cm

Il suffit de lancer le pendule 1 pour que les deux autres suivent

Deux sons consonants ont des harmoniques en commun

Les 3 premiers modes de vibration d'une corde de longueur L

vitesse de propagation de l'ébranlement dans une corde :

$v = (T / \mu)^{1/2}$

La fréquence fondamentale est: $fo = 1/ 2 L (T / \mu)^{1/2}$

T : tension de la corde

μ : masse par unité de longueur

Cette fréquence correspond à une longueur d'onde $\lambda o = v / fo = L / 2$

C'est la fréquence de résonance fondamentale mais il y a les harmoniques

$\lambda 1 = L \rightarrow f1 = 2fo$

$\lambda 2 = 2L / 3 \rightarrow f2 = 3fo$

$\lambda 3 = L / 2 \rightarrow f3 = 4fo$

les points de la corde excitée qui ne bougent pas sot des nœuds et les points où l'amplitude est maximale sont des ventres : c'est un phénomène d'ondes stationnaires

Ce qui donne les vibrations suivantes

Vibration en mode fondamental : $L = \lambda_0 / 2$ soit l'harmonique 1

1 ventre de vibration

Vibration à l'octave : $L = 2 (\lambda_1 / 2)$ soit l'harmonique 2

2 ventres de vibration

Vibration à la quinte : $L = 3 (\lambda_2 / 2)$ soit l'harmonique 3

3 ventres de vibration

L'impression auditive ne dépend pas de la relation de phase entre les harmoniques. L'oreille perçoit les différentes fréquences du son : **c'est le timbre**

Pour valoriser un élément mélodique dans la musique traditionnelle, un seul timbre est utilisé, ce qui le rend sensible par exemple au sein de la polyphonie

L'utilisation de plusieurs timbres donne une sensation à priori de dispersion de fréquences, mais enrichi la dimension sonore (fréquence, durée, intensité, timbre)

- ➔ **Les ondes sur une corde sont polarisées**

Si on attache une corde assez grande (4 m) sur un point fixe et que l'on agite l'autre extrémité, on observe que les mouvements de la corde peuvent se faire

- Sur un plan vertical (polarisation verticale)
- Sur un plan horizontal (polarisation horizontale)
- Sur un plan quelconque (polarisation à 25°, 50°, …)

On peut ainsi obtenir tous les modes en remuant la corde différemment (plus tendue, amplitude variable)

Ce n'est pas le cas d'une onde sonore dans l'air qui se déplace dans le sens de propagation
Les vagues à la surface de l'eau ne génèrent pas d'ondes polarisées
La lumière peut être polarisée

Pour un instrument de musique (sauf cordes frappées), la corde se déplace de tous les côtés

Les polariseurs

Plaçons la corde entre deux barres verticales

Dans ce cas seuls les mouvements verticaux sont permis

De même, si les deux barres sont horizontales, seuls les mouvements horizontaux sont permis

Changez de polarisation peut avoir des inconvénients :

Par exemple pour un violoncelle, si le musicien oriente son archet différemment en permanence, le son « fluctue ».

C'est pourquoi, il est important de garder l'archet le plus perpendiculairement par rapport aux cordes

10) Le son est une vibration

→ Mettre un film fin de cellophane (pour couvercles de pots de confiture) sur un coté d'une boite ronde ouverte d'un coté (diamètre environ 20 cm, hauteur environ 6 cm). La boite étant en position horizontale, film au dessus

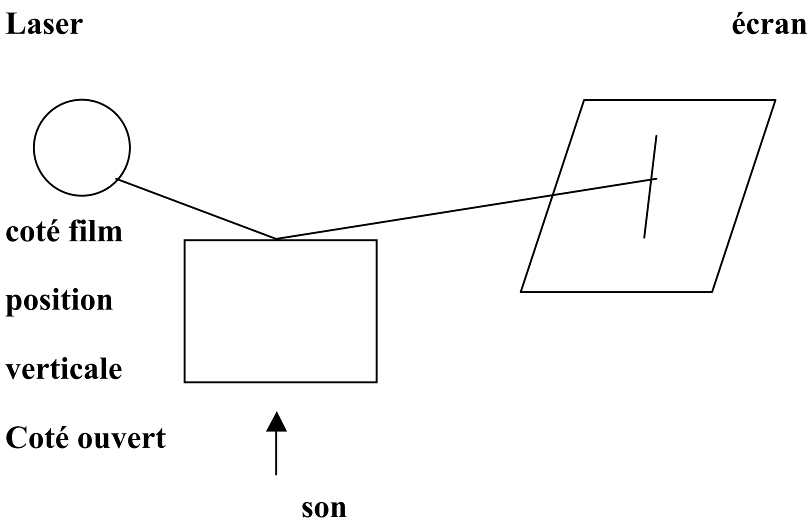
- saupoudrer de grains de riz et de semoule ou de sel la partie centrale du film
- en claquant du doigt au dessus du film (sans le toucher), les grains vont sautiller

Le sel vibre plus si on fait des sons plus graves (amplitude de la vibration plus importante)

→ Avec une boite ronde ouverte des deux cotés (diamètre et hauteur environ 15 cm)

Mettre un film sur un coté

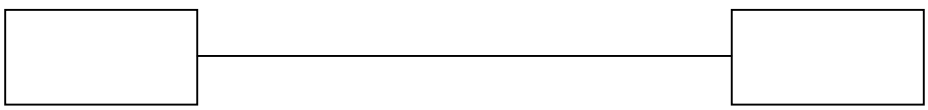
Envoyer un rayon laser linéaire sur le film pour qu'il se réfléchisse sur un écran blanc



En criant ou en jouant de la flute, du sifflet, de la cloche (on peut claquer des doigts ou taper des mains) le rayon laser sur l'écran va bouger avec la vibration du son

- **Expérience avec un fil de fer et deux boites de conserve métalliques ouvertes identiques Téléphone acoustique**

Percer un trou au fond de chaque boite pour fixer le fil de fer avec un nœud



Bien tendre le fil (si non cela ne marche pas aux fréquences vocales)

Parler d'un coté et écouter de l'autre

La voix émise fait vibrer le fond de la boite qui la transmet au fil et au fon