

Cordes et tubes : des outils d'analyse pour l'acoustique

par
Thierry Castermans
Pierre Gillis
Soizic Melin

Physique expérimentale et biologique
Eurékalia
Centre de Didactique des Sciences

UMH
UNIVERSITE DE MONS-HAINAUT

Document réalisé dans le cadre de la recherche en éducation 65/00
« Eveil à l'observation et à la pratique expérimentale en physique »

Direction de la recherche en éducation et du pilotage interréseaux
Ministère de la Communauté Française
Site internet <http://www.agers.cfwb.be>
2001

INTRODUCTION

Ce travail a pour but d'aider les enseignants dans leur tâche quotidienne, en leur fournissant un protocole d'expériences traitant des divers aspects physiques de l'acoustique.

Ces expériences sont en général réalisables avec un minimum de matériel et ne demandent pas de la part du professeur une grande expérience en bricolage. Il est parfois nécessaire de passer plus de temps pour mettre certaines manipulations au point, mais celles-ci sont alors souvent spectaculaires et ne peuvent laisser l'auditoire sans réaction. L'ordre dans lequel nous les présentons relève de la convention et le professeur aura toute latitude dans le choix des expériences qu'il réalisera avec ses élèves. En général, plusieurs expériences ont trait au même thème principal de l'acoustique (ondes stationnaires, phénomènes de résonance, ...) et nous avons ajouté des variantes aussi souvent que possible, afin de multiplier les possibilités de choix.

Dans un premier temps, nous mettons en évidence qu'un son est toujours dû à la vibration d'un objet. Une fois produit, ce son a besoin d'un milieu élastique (gaz, liquide, solide) pour se propager. Nous montrons que différentes techniques peuvent être utilisées pour déterminer la vitesse du son dans les gaz.

La nature ondulatoire du son peut être mise en évidence par des expériences d'interférence et de diffraction sonores. Comme toute onde, le son peut être réfléchi et réfracté.

Grâce à un micro relié à un oscilloscope (et mieux, relié à un ordinateur équipé d'un logiciel permettant l'analyse de Fourier), on peut aisément faire le lien entre les caractéristiques physiologiques d'un son (hauteur, intensité, ...) et les paramètres associés à l'onde correspondante (fréquence, amplitude, ...).

Un grand nombre de phénomènes acoustiques peuvent être expliqués à partir de la théorie ondulatoire : l'effet Doppler, le phénomène de battement, les ondes stationnaires (sur le principe desquelles fonctionnent la plupart des instruments de musique), ...

Nous proposons ensuite quelques expériences qui ont pour but de montrer les conséquences parfois spectaculaires de la résonance.

Enfin, nous présentons un modèle simple du système vocal humain, qui permet de comprendre la notion de formants et pourquoi la voix devient subitement aiguë lorsqu'on inhale de l'hélium...

Introduction aux expériences sur l'acoustique

Historique :

Les philosophes anciens avaient déjà des idées assez pertinentes au sujet de l'acoustique. *Sénèque* (2-66), par exemple, enseignait que c'est l'élasticité de l'air qui permet aux sons de se produire et de se propager. On attribue à *Pythagore* l'invention du monocorde, instrument composé d'une corde tendue entre deux chevalets fixes. Un chevalet mobile permettait d'immobiliser un certain point de la corde entre les deux chevalets : en le mettant au milieu, on avait la première octave supérieure, en le mettant au quart, la portion la plus petite donnait la deuxième octave, et ainsi de suite. Pythagore étudia ensuite les autres intervalles en comparant les longueurs de corde qui produisaient les sons correspondants.

C'est *Bacon* et *Galilée* qui établissent les bases de l'acoustique. *Gassendi* explique la hauteur des sons par la fréquence relative des vibrations. *Mersenne*, en 1640, est le premier à mesurer la vitesse du son dans l'air. Il détermine également le rapport entre les nombres de vibration des diverses notes de la gamme. *Otto von Guericke*, maire de Magdebourg, établit en 1654 que le son ne se propage pas dans le vide. *Kircher* donne l'explication de l'écho. *Sauveur* découvre en 1700 les nœuds et les ventres de vibration que *Chladni* vérifie sur des plaques saupoudrées de sable fin. *Newton* donne la théorie mathématique de la transmission du son, fondée sur la seule élasticité des milieux et qui rend bien compte de tous les faits observés. *Taylor*, *Daniel*, *Bernoulli*, *Euler* et *d'Alembert* soumettent à l'analyse la théorie des cordes vibrantes dans le courant du XVIIIème siècle.

Sturm, *Colladon* et *Regnault* déterminent la vitesse de propagation du son dans divers milieux. *Helmholtz* et *Koenig* analysent les sons complexes à l'aide de résonateurs et expliquent le timbre des sons et de la voix humaine. On parvient alors à l'enregistrer et à la transmettre grâce à la transformation des phénomènes mécaniques en phénomènes électriques.

Production des sons :

La plupart des sons que nous entendons dans la vie quotidienne ont pour origine la vibration d'un objet, par exemple la corde pincée d'une guitare, la membrane d'un haut-parleur, les cordes vocales, une cloche, etc. Il a aussi été établi que les impressions sonores ne prennent naissance que si la fréquence des vibrations est comprise entre certaines limites qui sont légèrement variables d'un individu à l'autre (il peut d'ailleurs être intéressant de faire l'expérience avec un haut-parleur relié à un générateur à fréquence variable). Pour donner naissance à un son audible, la fréquence d'un mouvement vibratoire doit être comprise entre 20 et 20 000 Hz.

→ Expérience proposée : « Origine du son ».

Propagation du son :

La propagation du mouvement vibratoire de la source ne peut se faire que par un ou plusieurs milieux élastiques interposés entre la source et le tympan de nos oreilles. Le son est un exemple d'onde longitudinale, c'est-à-dire que la perturbation du milieu élastique est parallèle à la direction dans laquelle se propage l'onde.

Contrairement à la lumière, le son ne se propage pas dans le vide. C'est en général l'air qui sert de milieu élastique entre la source vibrante et l'oreille, mais on peut remplacer l'air par des solides (si l'on place l'oreille contre le sol d'une route, par exemple, celle-ci transmet les sons ou bruits mieux que l'air) ou des liquides (les plongeurs entendent sous l'eau, les poissons s'enfuient lorsque l'on fait du bruit sur le rivage).

→ Expériences proposées : « La cloche à vide » ; « Le téléphone de chanvre » ; « Comment se propage le son ? ».

La transmission d'un son depuis la source jusqu'à l'oreille ne se fait pas instantanément. On voit par exemple l'éclair avant d'entendre le coup de tonnerre. Si le milieu dans lequel le son se propage est homogène, la vitesse du son est uniforme et les fronts d'onde sont des sphères centrées sur le point source.

La vitesse de propagation d'un mouvement vibratoire produit dans l'air est indépendante de la fréquence de ce mouvement vibratoire. C'est ainsi que l'audition d'une série de sons très rapprochés et très différents, par exemple d'un morceau de musique, n'est pas altérée par la distance, ce qui montre que les intervalles de temps qui séparent l'audition des différents sons sont les mêmes que ceux de leur émission. Pour mesurer la vitesse du son, on peut donc utiliser un son quelconque.

On utilisait jadis un signal sonore très bref, par exemple, un coup de canon. Le principe de l'expérience était très simple : on se plaçait à une distance connue du canon, on mettait en marche un chronomètre à l'instant où l'on apercevait la flamme qui sortait de la bouche du canon et on arrêtait le chronomètre à l'instant où l'on entendait la détonation. Si D est la distance de l'observateur au canon, et t le temps mis par le son pour lui parvenir, la vitesse du son est $v = D/t$. On néglige le temps mis par la lumière. Les résultats de cette mesure sont les suivants : à 0°C , la vitesse du son dans l'air sec est de 331.4 m/s ; dans les conditions atmosphériques ordinaires, elle est d'environ 340 m/s .

Une étude théorique de la question a conduit Laplace à donner la formule suivante pour la vitesse du son dans un gaz :

$$v = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}$$

formule dans laquelle p représente la pression du gaz et ρ sa masse volumique. γ est un coefficient qui dépend du nombre d'atomes que contient une molécule du gaz. Pour les gaz monoatomiques (gaz rares, ...), $\gamma = 1,67$; pour les gaz diatomiques et leurs mélanges, $\gamma = 1,40$; pour les gaz triatomiques, $\gamma = 1,32$.

Si l'on admet cette formule, il est facile de montrer que, conformément à l'expérience, la vitesse du son dans un gaz est indépendante de la pression. En effet, si ρ_0 représente la masse volumique du gaz dans les conditions normales, on a la relation :

$$\rho = \rho_0 \frac{p}{p_0} \frac{1}{1 + \alpha t}$$

où p_0 est la pression normale et α le coefficient de dilatation.

Pour un gaz donné, cette formule donne :

$$v = \sqrt{\mathbf{g} \frac{p_0}{\mathbf{m}_0} (1 + \mathbf{a}t)}$$

et donc, la vitesse du son à la température t est :

$$v(t) = v_0 \sqrt{1 + \mathbf{a}t}$$

Pour les gaz comprenant le même nombre d'atomes par molécule, on voit que la vitesse du son varie en raison inverse de la racine carrée de la densité du gaz.

On a pu vérifier expérimentalement ces différents résultats. Dans l'hydrogène, par exemple, à 15°C, la vitesse du son est de 1300 m/s ; elle est 4 fois plus petite dans l'oxygène, dont la densité par rapport à l'air est 16 fois plus grande que celle de l'hydrogène.

→ Expérience proposée : « Détermination de la vitesse du son ».

La vitesse du son dans l'eau a été déterminée par Colladon et Sturm, qui opérèrent sur le lac de Genève de la manière suivante : deux bateaux étaient amarrés à une distance connue. A l'un était attaché une grosse cloche qui plongeait dans l'eau et qu'un marteau venait frapper au moment même où une mèche, manœuvrée par la tige du marteau, mettait le feu à un petit tas de poudre placé l'avant de l'embarcation. A l'autre bateau, un observateur mesurait le temps qui s'écoule entre le moment où apparaît la lueur et le moment où l'onde sonore frappe la membrane d'un cornet acoustique plongé dans l'eau. On trouva 1435 m/s à la température de 8°C. Dans les solides, la vitesse du son est encore plus importante : de l'ordre de 5000 m/s, par exemple, pour l'aluminium (cf. tableau 1).

Matériau	Vitesse du son (m/s)
Air	340
Polyéthylène	920
Hélium	977
Eau	1500
Marbre	3810
Aluminium	5000

Tableau 1 : Vitesse du son dans divers matériaux à 15°C.

→ Expérience proposée : « Le tube de Kundt ».

Caractéristiques physiologiques d'un son :

Outre la *durée*, on peut distinguer trois qualités essentielles dans un son : l'*intensité*, la *hauteur* et le *timbre*.

L'*intensité* d'un son dépend de l'amplitude du mouvement vibratoire de la source qui lui donne naissance ; le son produit par un diapason, par exemple, s'affaiblit au fur et à mesure que ses oscillations s'amortissent. L'intensité dépend également de la surface de la source sonore, de la distance d de l'observateur à la source sonore (décroissance en $1/d^2$) et de la nature du milieu élastique interposé entre la source et l'oreille (le feutre et la laine affaiblissent considérablement les sons).

La *hauteur* d'un son est liée à la fréquence du mouvement vibratoire de la source sonore : les sons les plus aigus ont les fréquences les plus grandes et inversement.

Deux sons de même intensité et de même hauteur peuvent donner naissance à des sensations différentes. Ainsi, deux instruments de musique donnant la même note à l'unisson peuvent se distinguer l'un de l'autre ; on dit que ces deux sons diffèrent par leur « *timbre* ». L'analyse d'un son à l'oscilloscope via un micro montre que les différences de timbre correspondent à des différences de profil du signal périodique.

→ Expérience proposée : « Microphone et oscilloscope ».

Nature ondulatoire du son :

Tout comme la lumière, le son peut être réfléchi et réfracté. La *réflexion* du son donne lieu au phénomène bien connu de l'écho, qui est à la base de l'acoustique d'une salle de concert ou de cinéma. La *réfraction* du son, quant à elle, est mise en évidence lorsque le son voyage obliquement d'une zone d'air froid vers une zone d'air chaud (cf. fig.1). Voilà pourquoi le son peut être entendu de loin aux abords d'un lac gelé.

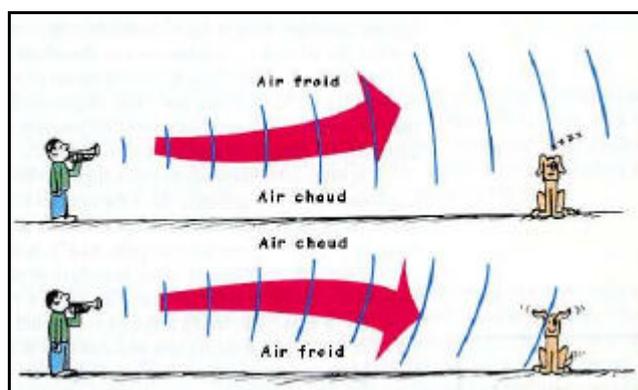


Fig. 1 : Réfraction du son lorsqu'il passe d'une zone d'air froid à une zone d'air chaud et vice-versa.

Si le son est une onde, on doit pouvoir mettre en évidence les phénomènes *d'interférence* et de *diffraction*.

→ Expérience proposée : « Propriétés ondulatoires du son ».

La nature ondulatoire du son permet de comprendre d'autres phénomènes ou encore le fonctionnement de certains objets que l'on rencontre dans la vie de tous les jours.

Ainsi, il est bien connu que la sirène d'une ambulance nous paraît plus aiguë lorsqu'elle s'approche de nous que lorsqu'elle s'éloigne de nous : c'est l'effet Doppler. La figure 2 présente une source sonore en mouvement de la gauche vers la droite. Les fronts d'ondes, sphériques en réalité, sont représentés ici comme des cercles.

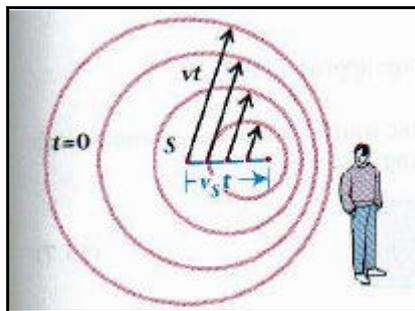


Fig. 2 : Explication de l'effet Doppler.

Connaissant la fréquence f de la source en mouvement, on peut déterminer la fréquence f' qu'un observateur perçoit. En effet, durant une période T de la source, l'onde se propage sur une distance vT , où v représente la vitesse du son. Pendant le même intervalle de temps, la source, se déplaçant à la vitesse v_s , parcourt la distance $v_s T$. La différence entre ces deux distances est la longueur d'onde du son perçu par l'observateur : $\lambda' = (v - v_s) T$. Dès lors, on en déduit que, pour une source sonore approchant l'observateur :

$$f' = \frac{f}{(1 - v_s / v)}.$$

Pour une source sonore s'éloignant de l'observateur, le signe moins devient un signe plus.

Lorsque deux sources sonores ont presque la même fréquence, un effet intéressant se produit : on entend un son dont la fréquence est la moyenne des deux. En outre, l'intensité du son perçu semble augmenter et diminuer au cours du temps, au lieu d'être constante. C'est le phénomène de battement. Si la fréquence d'une des deux sources est légèrement changée, on remarque que le rythme auquel l'amplitude du son varie change également. Ce rythme est appelé fréquence de battement. Lorsque la différence entre la fréquence des deux sources diminue, la fréquence de battement devient plus faible. Un guitariste, par exemple, peut tirer parti de cet effet pour accorder sa guitare avec un diapason. En augmentant ou en diminuant la

tension de chacune des cordes, il écoute la fréquence de battement. La corde est accordée au diapason lorsque la fréquence de battement devient nulle.

On explique facilement cet effet si on considère deux ondes sinusoïdales y_1 et y_2 , de même amplitude y_0 , mais de fréquences différentes f_1 et f_2 (cf. fig.3).

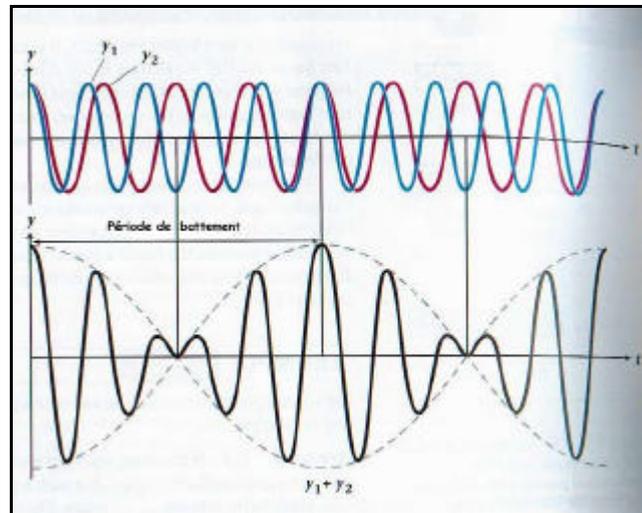


Fig. 3 : Le phénomène de battement.

Le principe de superposition des ondes nous permet d'écrire :

$$y = y_1 + y_2$$

$$y = y_0(\sin 2\pi f_1 t + \sin 2\pi f_2 t)$$

$$y = \left[2y_0 \cos 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{2} \right) t \right] \sin 2\pi \left(\frac{f_1 + f_2}{2} \right) t.$$

Cette équation représente l'amplitude d'une onde sonore dont la fréquence est la moyenne de la fréquence des deux sources (facteur en sinus) et dont l'amplitude varie doucement (facteur en cosinus).

→ Expériences proposées : « L'utilité du baffle » ; « L'effet Doppler » ; « Phénomène de battement ».

Ondes stationnaires :

Selon le principe de superposition, lorsque des ondes se propagent dans un même milieu, elles interfèrent et engendrent une onde résultante. Examinons le cas particulier où deux ondes de même fréquence et de même amplitude se déplacent librement dans des directions opposées. L'onde résultante semble ne plus se propager, on parle d'onde stationnaire : celle-ci présente des points immobiles là où les interférences sont destructives, et des points de vibration maximale là où les interférences agissent de manière constructive. Ces points sont respectivement appelés nœuds et ventres de vibration (cf. fig.4). Les positions des maxima et minima ne varient pas au cours du temps. Notons que la fréquence d'oscillation de l'onde stationnaire est identique à celle des ondes de départ.

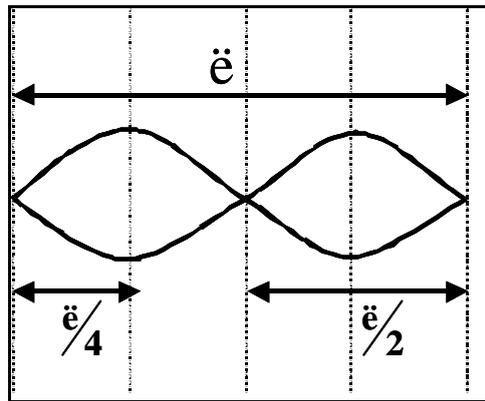


Fig. 4 : Nœuds et ventres se succèdent, séparés d'une distance égale au quart de la longueur d'onde.

Quand une onde incidente se propage sur un support de longueur finie L , elle se réfléchit – au moins partiellement – à une des extrémités : les ondes incidente et réfléchie se superposent alors. Seules certaines fréquences, nommées harmoniques ou fréquences de résonance, sont susceptibles de donner lieu à une onde stationnaire dans le système ; elles sont déterminées par les conditions aux limites du dispositif considéré. A toute autre fréquence, l'onde résultante n'est plus simplement sinusoidale, et son amplitude est inférieure à celle de l'onde stationnaire.

→ Expériences proposées : « Ondes sonores stationnaires » ; « Tubes d'aluminium » ; « Tubes ouvert et fermés » ; « Tubes sifflant » ; « La tasse de thé » ; « L'effet chocolat chaud » ; « Le tube de Kundt ».

Phénomènes de résonance :

Les vibrations communiquées à l'air par une source sonore peuvent faire amplifier les vibrations d'une source voisine ou même les provoquer si les périodes des deux sources sont égales ou des multiples entiers l'un de l'autre. Par exemple, si l'on place deux diapasons identiques l'un en face de l'autre et que l'on fait vibrer l'un d'eux, on constate que l'autre entre en vibration.

Les résonateurs sont des cavités dont l'air entre en vibrations peu amorties pour une ou plusieurs fréquences bien déterminées ; en particulier, les tuyaux sonores sont des résonateurs pour les sons qu'ils sont capables d'émettre. On utilisera les résonateurs pour renforcer le son émis par une source ; par exemple, en posant un diapason sur une caisse de résonance accordée avec le son qu'il émet, on en augmentera l'intensité.

Certains résonateurs, tels les résonateurs sphériques, n'entrent en vibration que pour une seule fréquence. Les caisses de résonance des instruments de musique doivent être au contraire très peu sélectives, de façon à ne pas renforcer inégalement certains sons ou certaines harmoniques.

La bouche, grâce aux formes différentes qu'elle est susceptible de prendre, sert de résonateur pour les différents sons de la voix.

→ Expériences proposées : « Résonance d'une colonne d'air » ; « Phénomène de résonance dans un tube » ; « Les diapasons et le phénomène de résonance » ; « Le tube de Rijke » ; « Un phénomène de résonance poussé à l'extrême » ; « Phénomène de résonance à partir de bruit blanc ».

Applications :

De multiples phénomènes de la vie courante sont liés à l'acoustique. Nous avons choisi d'expliquer le principe du sonar et le système vocal humain à l'aide de deux expériences simples.

→ Expériences proposées : « Le radar acoustique » ; « La voix humaine ».

Liste des manipulations

Thème	Expérience
Nature – origine du son	La tige vibrante La paille chantante Le diapason
Propagation du son	La cloche à vide Comment se propage le son ? Le téléphone de chanvre Détermination de la vitesse du son
Caractéristiques physiologiques du son	Microphone et oscilloscope
Nature ondulatoire - réflexion - réfraction - interférences - diffraction	Propriétés ondulatoires du son Ballons Interférences (exp. de Young + le trombone) Collimateur acoustique L'utilité du baffle L'effet Doppler Phénomène de battement
Ondes stationnaires	Ondes sonores stationnaires Tubes d'aluminium Tubes ouverts et fermés Tubes sifflants La tasse de thé L'effet « chocolat chaud » Le tube de Kundt
Phénomènes de résonance	Résonance d'une colonne d'air Phénomène de résonance dans un tube Les diapasons et le phénomène de résonance Le tube de Rijke Un phénomène de résonance poussé à Phénomène de résonance à partir de bruit blanc
Applications	Le radar acoustique La voix humaine

Origine du son

But de la manipulation :

Expliquer l'origine du son : une vibration de l'air.

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : une petite tige métallique – une paille – des ciseaux – un diapason – un petit marteau en caoutchouc – un stroboscope (facultatif) – un récipient – de l'eau.

Mode opératoire :

1^{ère} expérience : faire vibrer la petite tige métallique sur le bord d'une table (cf. fig.1). On peut produire des sons de différentes hauteurs en augmentant ou en diminuant la longueur de la tige.

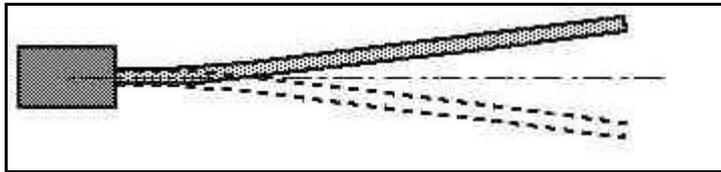


Fig. 1 : Vibration d'une petite tige métallique autour de sa position d'équilibre.

2^{ème} expérience : aplatir l'extrémité d'une paille et la couper en biseau (cf. fig.2). Souffler dans la paille par le bout ainsi découpé. Le son est produit par la vibration des deux lamelles. Comme dans la première expérience, le son émis devient de plus en plus aigu au fur et à mesure que la paille est raccourcie.

Remarque : en inspirant de l'hélium et en soufflant dans la paille, on produit un son plus aigu (cf. l'expérience « La voix humaine »).



Fig. 2 : Lorsque l'on souffle dans la paille ainsi découpée, on produit un son nasillard.

3^{ème} expérience : un son pur peut être produit avec un diapason. Pour mettre clairement en évidence que les deux branches du diapason vibrent, on peut soit utiliser un stroboscope (cf. fig.3), soit plonger simplement le diapason dans un récipient contenant de l'eau. L'expérimentateur risque alors d'être éclaboussé par le mouvement de l'eau provoqué par la vibration du diapason.



Fig. 3 : Avec un stroboscope, on peut mettre en évidence le mouvement vibratoire des deux branches d'un diapason.

La cloche à vide

But de la manipulation :

Démontrer que les ondes sonores nécessitent un milieu matériel pour se propager.

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : une cloche à vide – une pompe à vide – un manomètre – une sonnerie électrique.

Mode opératoire : mettre la sonnerie en marche dans la cloche à pression atmosphérique ; créer le vide dans la cloche à l'aide de la pompe ; rétablir la pression normale à l'intérieur de la cloche (cf. fig.1).

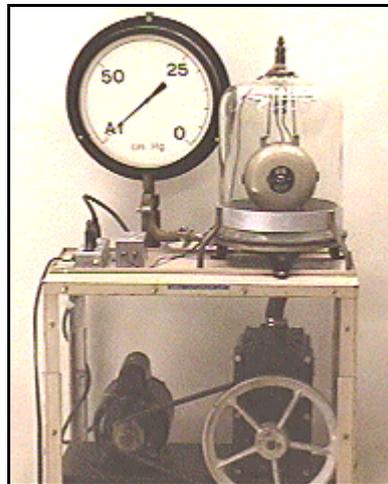


Fig. 1 : Montage expérimental.

Observations : au fur et à mesure que l'on pompe, le bruit de la sonnerie devient de plus en plus faible, pour finalement disparaître totalement. Lorsque l'on rétablit peu à peu la pression au sein de la cloche, la sonnerie se fait de nouveau entendre...

Conclusion : de par nos observations, il est clair que le son a besoin d'air pour se transmettre... En fait, le son se propage encore mieux dans les solides ou les liquides que dans l'air, mais la plupart des sons nous parviennent en se propageant dans l'air. Pour s'en convaincre, on peut frapper un diapason pour le faire vibrer ; il émet alors un son caractéristique relativement faible. Il est aisé d'amplifier ce son en déposant le diapason sur une table ou une caisse de résonance (la caisse d'un violon, par exemple). La vibration du métal constituant le diapason se transmet à l'air contenu dans la caisse de résonance, qui se met lui-même à vibrer ; le son se propage donc bien dans les solides...

Comment se propage le son ?

But de la manipulation :

Matérialiser les effets d'une onde sonore, d'une vibration de l'air. Comprendre le mode de propagation du son (prouver qu'il s'agit d'une onde longitudinale). Comprendre le principe de l'audition.

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : le couvercle d'une grande boîte à biscuits – une feuille de plastique – un gros élastique – un moule à gâteau rond – une cuillère en bois – du sucre (ou des grains de riz).

Mode opératoire : Fabriquer un tambour en étirant une feuille de plastique sur le moule à gâteau rond. Mettre l'élastique autour du moule pour tendre le plastique. Saupoudrer une cuillerée de sucre brun sur la membrane du tambour. Tenir le couvercle près du tambour et le frapper fortement avec la cuillère en bois.



Observation : On voit le sucre sautiller sur la peau du tambour.

Interprétation : Lorsque l'on tape sur le couvercle, le métal continue à vibrer après le choc. Quand il vibre, il fait vibrer l'air alentour. Ces petites vibrations de l'air (les ondes sonores) se propagent rapidement dans toutes les directions. Quand elles atteignent la membrane du tambour, elles la font vibrer aussi et les grains de sucre se mettent à sauter. L'onde sonore qui atteint l'oreille des observateurs leur transmet le bruit.

Comment entendons-nous ?

La petite expérience qui vient d'être décrite permet de comprendre le principe de l'audition.

Les pavillons de chacune de nos oreilles canalisent les sons par un conduit jusqu'au tympan – une peau tendue comme la peau d'un tambour. Le tympan est si fin que même les sons les plus faibles le font vibrer, et quand il vibre, il fait bouger un petit os, le marteau, contre un autre os, l'enclume. L'enclume actionne à son tour un troisième os, l'étrier (cf. fig.1).

De cette façon, les vibrations sont amplifiées et transmises à l'oreille interne. Là, des cellules nerveuses sont stimulées, lesquelles envoient alors des signaux par le nerf auditif jusqu'au cerveau.

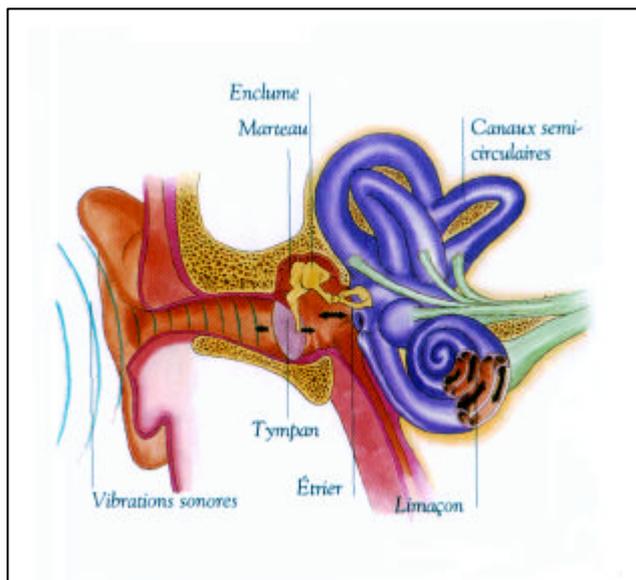


Fig. 1 : Schéma du système auditif humain (oreille externe, moyenne, interne).

Les ondes sonores :

Les ondes sonores ne ressemblent pas aux vagues de la mer. Les vagues montent et descendent faisant des creux et des crêtes à la surface : ce sont des ondes transversales. Les ondes sonores, elles, sont longitudinales. Cela signifie que l'air est alternativement comprimé et dilaté, comme le ressort ci-contre (cf. fig.2).

Quand un son est produit, les molécules d'air près de la source sont comprimées. Elles bousculent à leur tour les molécules situées devant elles, puis reviennent à leur position initiale. C'est ainsi que se propagent dans l'air les compressions et les dilatations.

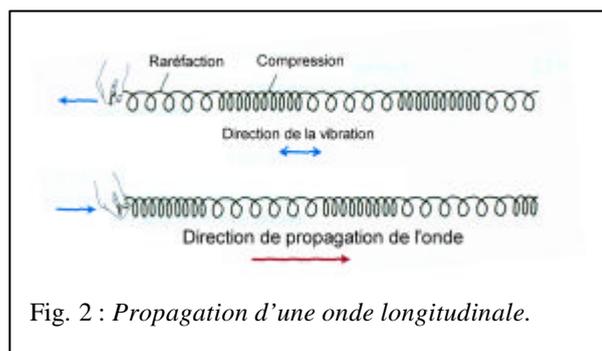


Fig. 2 : Propagation d'une onde longitudinale.

Une autre expérience :

Une autre petite expérience permet de se convaincre que les ondes sonores sont longitudinales :

Une bougie est placée en face d'un haut-parleur (~20 cm de diamètre) émettant des ondes sonores d'une dizaine de Hertz (cf. fig.3).

La flamme se met à bouger, en suivant le mouvement de va-et-vient de l'air. Ceci illustre la nature longitudinale des ondes sonores (cf. fig.4).



Fig. 3 : Dispositif expérimental.



Fig. 4 : Mouvement oscillatoire de la flamme dû aux ondes sonores.

Le téléphone de chanvre

But de la manipulation :

Montrer que le son peut se propager autrement que dans l'air.

Description de l'expérience :

Matériel nécessaire : deux boîtes de conserve vides – de la ficelle (7 ou 8 m) – une perceuse.

Mode opératoire : ôter le couvercle de chacune des boîtes et percer le fond de celles-ci. Relier les deux boîtes par la ficelle (cf. fig.1). Chaque boîte de conserve sert aussi bien d'émetteur de son que de récepteur, selon qu'on parle dans la boîte ou qu'on la place sur son oreille.



Fig. 1 : Le téléphone de chanvre.

Observations : la ficelle doit être tendue pour remplir son office de ligne de transmission (rappelons-nous en effet qu'une vibration ne peut exister sans la présence d'une force de rappel). A 7 ou 8 mètres de distance, on peut vérifier que ce téléphone avec fil permet de converser à voix (relativement basse), alors que la même intensité sonore est inaudible si l'on essaie de se passer de la ligne de chanvre.

Remarque : on peut réaliser la même expérience avec un tuyau d'arrosage aux extrémités duquel on a fixé deux entonnoirs. Cependant, avec le tuyau, la propagation du son se fait dans l'air...

Microphone et oscilloscope

But de la manipulation :

Visualiser la forme des ondes provenant de différents sons. Distinguer un son d'un bruit. Se familiariser avec l'appareillage utilisé également dans d'autres manipulations.

Introduction :

Le microphone est un récepteur de sons artificiel. Le principe de son fonctionnement est le suivant : la membrane qui le constitue se met à vibrer dès la réception d'un son quelconque. Ce mouvement vibratoire de la membrane crée alors une tension alternative de même fréquence aux bornes de la bobine contenue dans le micro, qui est visualisée au moyen de l'oscilloscope.

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : un microphone – un oscilloscope – différentes sources sonores (voix humaine, diapasons, enregistrement de différents instruments de musique, ...).

Mode opératoire : Relier le microphone à l'oscilloscope comme indiqué à la fig.1 de manière à faire apparaître correctement le signal reçu par le microphone. Visualiser la forme des ondes sonores émises lorsque l'on parle, chante, siffle ou joue d'un instrument de musique.

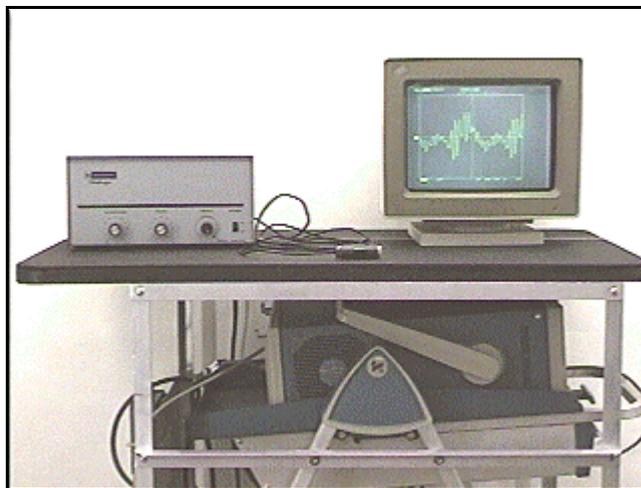


Fig. 1 : Photo du montage.

Observation : Cet appareillage peut être utilisé pour illustrer la différence entre un son et un bruit en observant la périodicité du signal correspondant au son émis par un diapason, par exemple, et l'absence de périodicité du signal correspondant au claquement des mains.

Détermination de la vitesse du son

But de la manipulation :

Déterminer, de plusieurs manières différentes, la vitesse du son dans un gaz.

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : un générateur d'onde sinusoïdales (3000 Hz) – un petit haut-parleur – un micro – un oscilloscope – un banc optique permettant d'aligner le micro et le haut-parleur (éventuellement).

Mode opératoire : brancher le haut-parleur sur le générateur et relier le micro à l'oscilloscope, qui permet de visualiser l'onde sinusoïdale émise par le générateur (cf. fig.1). Le montage doit être réalisé de telle manière que l'oscilloscope soit déclenché par le générateur lui-même.

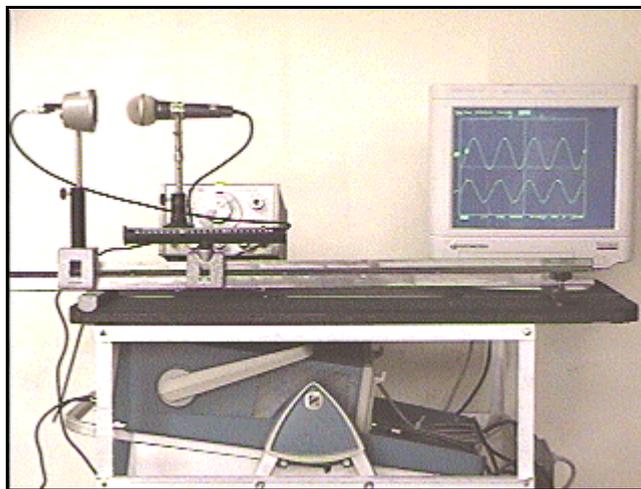


Fig. 1 : *Montage expérimental.*

Observations : On constate qu'en déplaçant le micro par rapport au haut-parleur, le signal reçu est déphasé par rapport au signal émis. De plus, il est également « dilué » spatialement, c'est-à-dire que plus on éloigne le micro du haut-parleur, plus le signal reçu est faible.

Mesures réalisables :

- on peut très facilement vérifier quantitativement que l'intensité du signal décroît comme l'inverse du carré de la distance séparant le haut-parleur du micro.
- en mesurant le déplacement du micro au moyen d'une règle et le déphasage entre le signal émis et le signal reçu à l'aide de l'oscilloscope, on peut aisément calculer la vitesse du son : celle-ci est en fait égale à la mesure du déplacement du micro divisée par la différence de déphasage en temps entre le signal émis et le signal reçu.

Première variante :

Matériel nécessaire : un générateur d'ondes carrées – un haut-parleur – un micro – un oscilloscope – un banc optique permettant d'aligner le micro et le haut-parleur (éventuellement).

Mode opératoire : brancher le haut-parleur sur le générateur d'ondes carrées ; relier le micro à l'oscilloscope ; visualiser à l'aide de l'oscilloscope les signaux émis et reçu.

Observations : on constate que le générateur d'ondes carrées agit comme un générateur d'impulsions. Il est possible de mesurer l'écho de chacune de ces impulsions (mesure de temps). Connaissant la distance entre le haut-parleur et le micro (la distance que doit parcourir le son), on peut calculer la vitesse du son en utilisant la loi bien connue : $\Delta x = v \Delta t$

Seconde variante :

Matériel nécessaire : un oscilloscope – un tuyau d'arrosage (d'une dizaine de mètres de long) – 2 micros – un petit marteau – une bonbonne d'hélium.

Mode opératoire : attacher les deux micros à chacune des extrémités du tuyau d'arrosage rempli d'hélium ; les connecter ensemble à l'oscilloscope (cf. fig.2). Frapper l'un des deux micros à l'aide du marteau. Observer à l'écran.

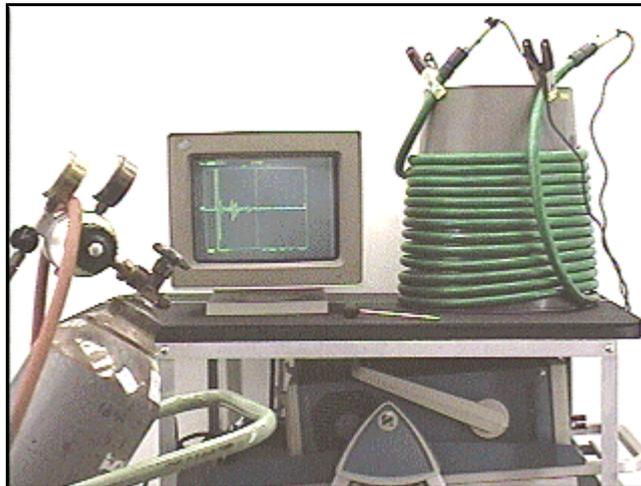


Fig. 2 : Montage expérimental.

Observations : sur l'écran de l'oscilloscope, on voit apparaître une impulsion au moment où l'on frappe l'un des micros. Directement après, on observe l'apparition d'une deuxième impulsion, beaucoup plus faible.

Interprétation : la deuxième impulsion observée correspond au signal reçu par le second micro, situé à l'autre extrémité du tuyau. Le délai entre les deux impulsions correspond au temps mis par le son pour parcourir la longueur du tuyau. Connaissant celle-ci, il est aisé de calculer la vitesse du son. L'intensité plus faible de la seconde impulsion est due au fait que le son est atténué lors de sa propagation dans le tuyau.

Propriétés ondulatoires du son

But de la manipulation :

Illustrer le caractère ondulatoire du son.

Introduction :

Pour se convaincre que le son est une onde, il suffit de montrer que son comportement est semblable à celui des ondes. On doit dès lors pouvoir mettre en évidence les phénomènes de réflexion, de réfraction, de diffraction et d'interférences sonores.

Description de la manipulation :

1. Réflexion :

Matériel nécessaire : 2 tubes en carton – 1 montre faisant « tic-tac » – différents obstacles plans (assiette, ...) constitués de différents matériaux (papier cartonné, liège, ...).

Mode opératoire : Placer la montre à l'extrémité d'un des deux tubes orienté vers un des obstacles. A l'aide du second tube, écouter le son provenant de la montre et réfléchi par l'obstacle (cf. fig.1). Disposer ce second tube de façon à ce que la réflexion soit optimale.

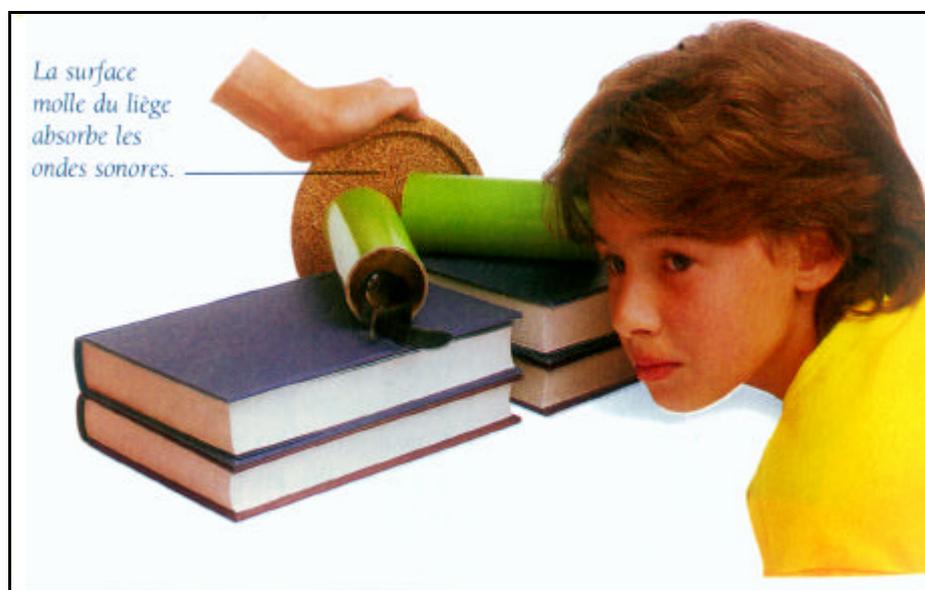


Fig. 1 : Réflexion du son.

Observation : Comme pour la réflexion de la lumière, l'angle d'incidence du « rayon sonore » est égal à l'angle de sa réflexion (on entend par « rayon sonore » la direction dans laquelle se propagent les ondes sonores). Il faut remarquer que, dans le cas d'un obstacle en liège, les ondes sonores sont fortement absorbées.

2. Réfraction :

Matériel nécessaire : 3 ballons de baudruche gonflés respectivement avec du CO_2 , de l'hélium et de l'air (ces ballons doivent avoir un diamètre d'environ 20 cm) – un haut-parleur – un micro de bonne qualité – un banc d'optique (facultatif) – un générateur à fréquence variable – un oscilloscope.

Mode opératoire : Placer sur le banc d'optique le haut-parleur et le micro (l'utilisation du banc est facultative, mais il est impératif que ces deux éléments soient alignés) à une distance d'environ 40 cm l'un de l'autre. Brancher le haut-parleur sur le générateur de façon à ce qu'il émette un son dont la fréquence est comprise entre 2 et 4 kHz. Brancher le micro sur l'oscilloscope pour visualiser le signal reçu. Insérer les ballons (un à la fois) entre le haut-parleur et le micro et observer l'évolution du signal (cf. Fig.2).

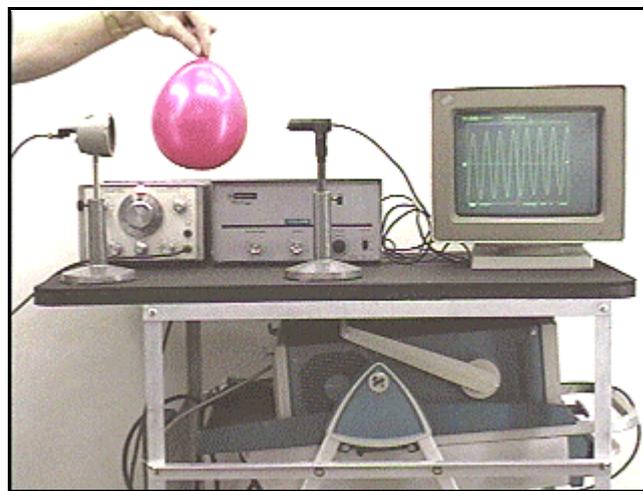


Fig. 2 : Réfraction du son.

Observation : Lorsqu'on insère le ballon rempli d'air, le signal reçu par l'oscilloscope ne varie quasiment pas. Par contre, dans le cas du ballon rempli de CO_2 (d'hélium), on observe une augmentation (diminution) du signal...

Interprétation : Les observations qui viennent d'être faites montrent que le son peut être réfracté. Le ballon de baudruche rempli de CO_2 , de par sa forme convexe et vu que la vitesse de propagation du son dans le CO_2 est plus petite que celle dans l'air, agit en fait comme une lentille convergente. Lorsqu'on insère le ballon rempli de gaz entre le haut-parleur et le micro, l'onde sonore est focalisée et l'intensité augmente au niveau du micro. La vitesse de propagation du son dans l'hélium étant plus grande que celle dans l'air, la « lentille sonore » est dans ce cas divergente, d'où la diminution d'intensité du signal reçu par l'oscilloscope.

Analyse quantitative du phénomène :

En principe, on peut très bien imaginer de pousser la comparaison avec l'optique et tenter de déterminer l'ordre de grandeur de la vitesse du son dans le CO_2 à partir de « l'indice de réfraction » n de la lentille acoustique convergente. Bien entendu, cette lentille n'est pas mince, mais un calcul relativement simple basé sur la loi de la réfraction permet d'obtenir une

expression analytique de n . Connaissant cette valeur et celle de la vitesse du son dans l'air dans les conditions de l'expérience, on peut alors calculer la vitesse du son dans le CO_2 .

Dans ce qui suit, nous ne présentons que les principaux résultats du calcul. L'idée générale est d'étudier la déviation du son, c'est-à-dire un faisceau parallèle incident, par un ballon rempli de gaz (cf. fig.2b). Nous traitons le cas où $n > 1$, le son se propageant moins vite dans le ballon que dans l'air.

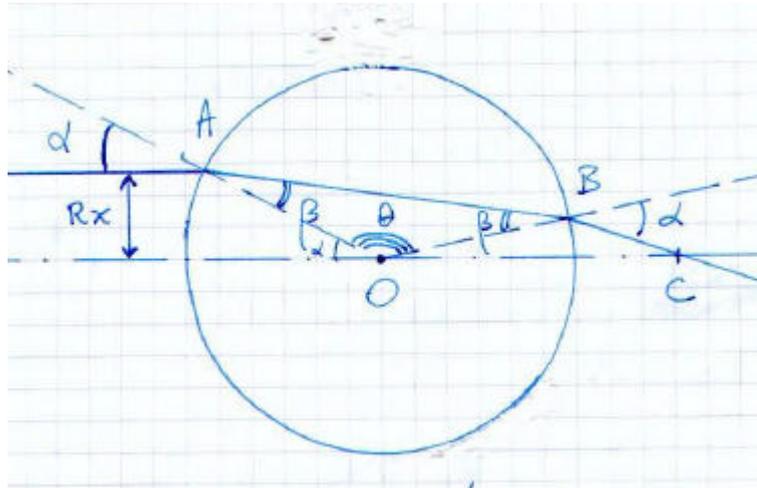


Fig. 2b : Le cercle représente le ballon rempli de CO_2 . On considère deux réfractions sonores dans un plan.

Nous obtenons l'expression suivante :

$$y(x) = \frac{\frac{1}{2} R n^2}{(n^2 - 2x^2)\sqrt{1-x^2} - (1-2x^2)\sqrt{n^2-x^2}}$$

où $x = \sin\alpha$,
 $y = \text{OC}$,
 R est le rayon du ballon supposé sphérique,
 n est l'indice de réfraction de la lentille convergente.

Les deux cas limites suivants se présentent :

$$(1) \quad n < \sqrt{2}$$

$$(2) \quad n > \sqrt{2}$$

(1) Dans le premier cas, la fonction $y(x)$ est monotone décroissante pour $0 < x < 1$; il y a donc un « vide de son » le long de l'axe du faisceau entre le ballon et le point situé à

$$y(x=1) = \frac{R n^2}{2\sqrt{n^2-1}}. (*)$$

La mesure de ce point permet (en principe, mais c'est délicat...) de déterminer n :

$$n^2 = 2 \left(\frac{y}{R} \right) \left[\frac{y}{R} - \sqrt{\left(\frac{y}{R} \right)^2 - 1} \right].$$

(2) Pour $n^2 = 2$, la formule (*) donne $y = R$. Si $n^2 > 2$, on peut calculer un y_{\min} , où une concentration de « rayons sonores » est attendue, mais il est dans le ballon :

$$y_{\min} = \frac{3\sqrt{3} R n^2}{2(1+n^2)^{3/2}}$$

en effet, pour $n^2 > 2$, $y_{\min} < R$!

3. Interférences :

Dans ce paragraphe, nous proposons un moyen simple de montrer le phénomène d'interférence sonore. La première expérience nécessite la confection d'un « trombone » au moyen de tubes de PVC montés sur une planche en bois. Un haut-parleur et un microphone relié à un oscilloscope permettent alors respectivement de produire et recevoir du son. Voici le principe de fonctionnement de ce « trombone ».

Le son émis par un haut-parleur se propage à l'intérieur d'un tube qui se divise en deux parties au point P (cf. fig.3 et 3 bis). A partir de ce point, une partie de l'onde sonore se propage dans un sens et l'autre partie dans le sens opposé, parcourant ainsi deux chemins différents de longueurs d_1 et d_2 , avant de se rejoindre, et d'interférer au point R, où se trouve un microphone relié à un oscilloscope, qui permettra de vérifier plus quantitativement la perception du son. La distance d_2 peut être modifiée grâce à la partie mobile du tube coulissant comme la coulisse d'un trombone.

Si la différence de chemin parcouru est nulle, ou égale à un multiple entier de longueur d'onde, $D_d = |d_2 - d_1| = k\lambda$, les deux ondes atteignent en phase le récepteur et produisent une interférence constructive : le microphone perçoit alors un maximum d'intensité sonore. Par contre, si on déplace la partie amovible du tube de sorte que la différence parcourue équivaut à un multiple de demi-longueur d'onde, $D_d = |d_2 - d_1| = k'\lambda/2$, où k' est impair, les deux ondes arrivant au niveau du récepteur sont déphasées de 180° . Dans ce cas, les deux ondes s'annulent et donnent lieu à une interférence destructive : le microphone ne détecte dès lors aucun son.

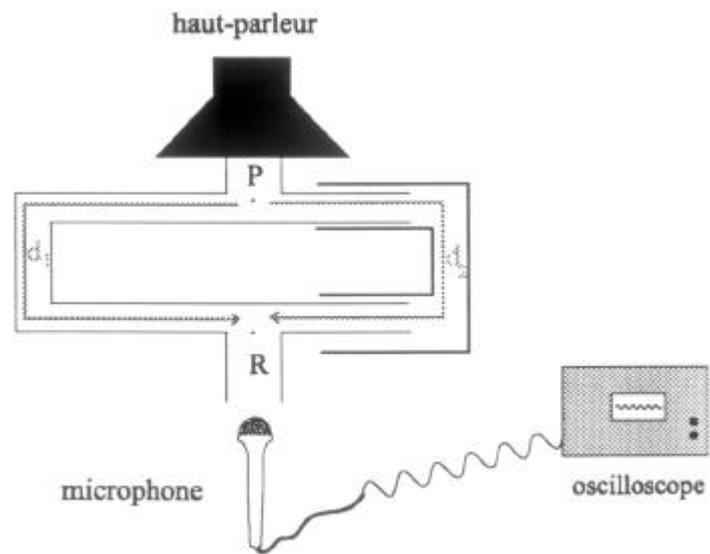


Fig. 3 : Schéma et principe de fonctionnement du trombone.



Fig. 3 bis : Photo du montage expérimental.

Voici une autre expérience permettant de mettre en évidence le phénomène d'interférence sonore.

Plaçons deux haut-parleurs à un peu plus d'un mètre de distance l'un de l'autre, tournés vers le local à sonoriser et légèrement croisés (cf. fig.4). Cette configuration est souvent conseillée pour les chaînes hi-fi, particulièrement pour les modèles micro.

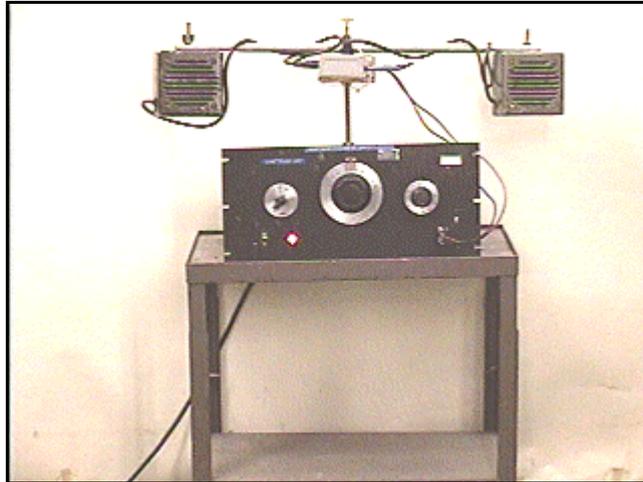


Fig. 4 : Appareillage permettant de créer des interférences sonores.

Alimentons les deux haut-parleurs à l'aide de la même tension sinusoïdale, dont la fréquence sera, par exemple de 1000 Hz. L'oreille « nue » suffit pour constater la réalité du phénomène d'interférence. En effet, à une fréquence de 1000 Hz, la longueur d'onde λ de 34 cm est à notre échelle, et en se déplaçant face aux deux baffles (ou en déplaçant ceux-ci), il est possible, à l'aide de nos détecteurs naturels, de localiser des zones où le son est très faible – les interférences y sont destructives –, et d'autres où il est plus fort – les interférences y sont constructives.

Notre perception sera confirmée plus quantitativement à l'aide d'un microphone relié à un oscilloscope. Pour nous convaincre qu'il s'agit bien d'interférences, nous mesurerons qu'à l'endroit d'un minimum d'intensité, le son augmente lorsqu'un des deux haut-parleurs est coupé. Pour ce qui est de notre chaîne hi-fi, si le phénomène d'interférence doit en principe jouer, il ne sera que très peu perceptible car noyé dans la complexité spectrale d'un morceau de musique (les interférences ne se produisent qu'entre signaux de même fréquence !). En outre, l'effet stéréo empêche que les mêmes ondes sonores soient émises simultanément des deux côtés. Des techniques très sophistiquées permettent de créer de l'anti-son qui annihile ou réduit les nuisances sonores comme dans certains aéroports et dans le tunnel des scanners par résonance magnétique où est introduit le patient.

4. Diffraction :

Matériel nécessaire : tube en plexiglas (environ 50 cm) – haut-parleur – générateur à fréquence variable.

Mode opératoire : Réaliser le « collimateur acoustique » en mettant bout à bout le tube et la sortie du haut-parleur (cf. fig.5). Orienter le collimateur vers la classe et émettre des sons de

basse fréquence (de l'ordre de 120 Hz), puis ensuite des sons de haute fréquence (de l'ordre de 4000 Hz).

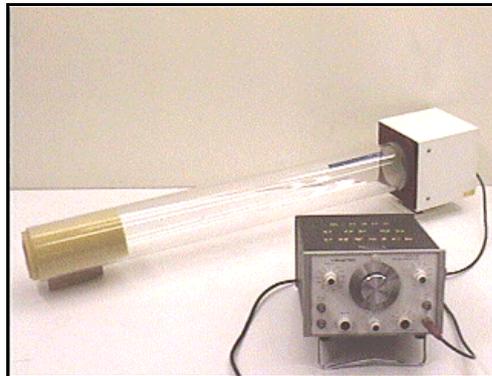


Fig. 5 : Collimateur acoustique.

Observation : Lorsque le haut-parleur émet des sons de basse fréquence, les ondes sonores sont fortement diffractées et, de ce fait, l'effet de collimation est peu important. Par contre, pour des sons à haute fréquence, la diffraction du son est beaucoup plus faible et le « faisceau sonore » est beaucoup plus directionnel. Ceci démontre l'effet de la fréquence sur la diffraction du son.

L'utilité du baffle

But de la manipulation :

Démontrer les phénomènes de diffraction et interférence sonore. Expliquer l'utilité du baffle.

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : un magnétophone à cassette – un petit haut-parleur – un baffle (planche d'environ 50X50 cm percée d'un trou de même dimension que le haut-parleur).

Mode opératoire : mettre en route le magnétophone (avec une cassette contenant de la musique avec beaucoup de basses). Ecouter sans et puis avec le baffle (cf. fig.1).

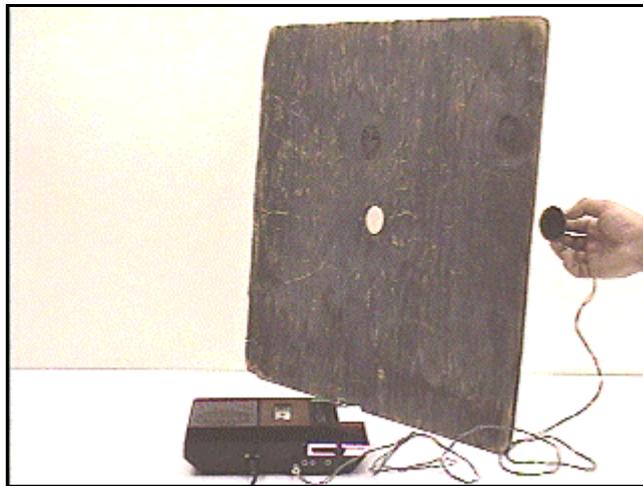


Fig. 1 : *montage expérimental*

Observations : les basses passent très mal dans le petit haut-parleur. Par contre, lorsque l'on tient le haut-parleur derrière le baffle, le son devient nettement plus fort, en particulier les basses.

Interprétations : un haut-parleur produit deux ondes sonores distinctes (l'une provient de l'avant et l'autre de l'arrière) qui sont en opposition de phase respectivement. En l'absence du baffle, ces ondes sonores sont diffractées dans toutes les directions et, étant en opposition de phase, interfèrent destructivement (en particulier les basses). Le baffle réduit la diffraction et donc le phénomène d'interférence.

Variante :

On peut également faire la même expérience en utilisant un diapason et un carton dans lequel on a découpé une ouverture rectangulaire (cf. fig.2). Lorsque le diapason vibrant est placé dans cette ouverture, c'est-à-dire que chaque branche se situe de part et d'autre du carton, le son perçu est plus fort.

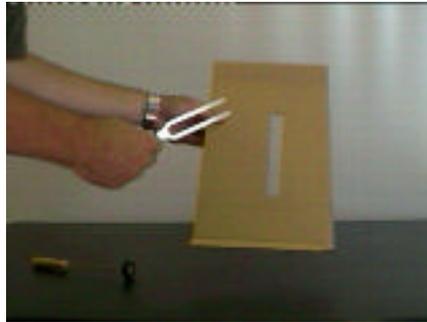


Fig. 2 : Une ouverture rectangulaire pratiquée dans un carton et un diapason suffisent pour réaliser l'expérience.

L'effet Doppler

But de la manipulation :

Reproduire l'effet Doppler en classe.

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : un diapason – un marteau – de la ficelle.

Mode opératoire : attacher le diapason à la ficelle, et le faire tourner après l'avoir frappé avec le marteau (cf. fig.1).

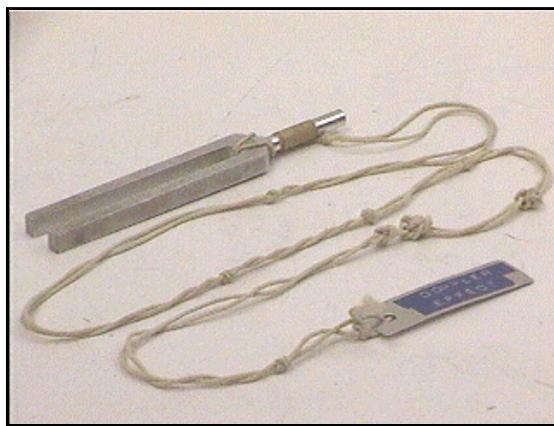


Fig. 1 : *Matériel nécessaire.*

Observations : on perçoit facilement que le son du diapason devient plus aigu (grave) lorsqu'il s'approche (s'éloigne) de l'observateur.

Variante :

On peut très bien remplacer le diapason par un haut-parleur alimenté par un générateur à fréquence variable (cf. fig.2). L'avantage est que le son est produit en continu et ne disparaît pas au cours du temps.



Fig. 2 : *Une variante : utiliser un haut-parleur.*

Phénomène de battement

But de la manipulation :

Faire entendre le phénomène de battement à toute la classe.

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : deux diapasons identiques montés sur leur caisse de résonance – un cavalier – un marteau en caoutchouc.

Mode opératoire : cette expérience très simple consiste à faire vibrer deux diapasons dont la fréquence de résonance est légèrement différente. Pour ce faire, il suffit de prendre deux diapasons identiques et de monter un cavalier sur l'un d'eux (cf. fig.1). Le phénomène de battement est alors nettement perceptible.



Fig. 1 : Deux diapasons identiques dont l'un est muni d'un cavalier permettent de produire le phénomène de battement.

Ondes sonores stationnaires

But de la manipulation :

Mettre en évidence des ondes sonores stationnaires. Montrer la succession des ventres et des nœuds.

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : un générateur – deux petits haut-parleurs – un micro – un banc optique – un oscilloscope.

Mode opératoire : brancher les deux haut-parleurs au générateur (celui-ci étant réglé sur 3000 Hz environ). Relier le micro à l'oscilloscope et au générateur (pour comparer les signaux émis et reçu). Faire glisser le micro sur le banc optique et observer le signal reçu (cf. fig.1).



Fig. 1 : En promenant un micro entre deux haut-parleurs se faisant face et émettant la même fréquence, on retrouve les minima et maxima successifs caractéristiques de l'onde

Observations : on retrouve les minima et les maxima successifs caractéristiques d'une onde stationnaire (expérience de la corde vibrante).

Variantes : on peut réaliser la même expérience en remplaçant un haut-parleur par une plaque métallique (cf. fig.2).



Fig. 2 : La même expérience est réalisée en remplaçant un haut-parleur par une plaque métallique.

Il est également possible de montrer que le signal reçu par le micro est maximum lorsque celui-ci est placé au foyer d'une parabole (cf. fig.3).

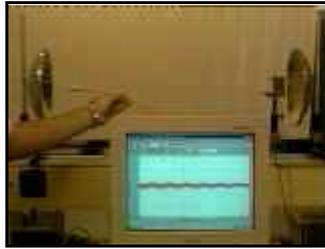


Fig. 3 : Le signal reçu par le micro est maximum lorsque l'émetteur et le récepteur sont situés respectivement au foyer de chacune des paraboles.

Tubes d'aluminium

But de la manipulation :

Illustrer les ondes stationnaires longitudinales dans une tige d'aluminium.

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : une tige en aluminium (pleine ou creuse) – de la colophane (sorte de résine un peu collante que l'on applique sur l'archet des violons) – des gants ou un vieux chiffon.

Mode opératoire : appliquer la colophane sur un gant ou un vieux chiffon légèrement humide et frotter la tige en la tenant fermement à un nœud de vibration (par exemple, à mi-longueur, au quart de la longueur, ...).



Fig. 1 : En maintenant la tige à mi-longueur, on produit la note fondamentale.

Observations : si l'on tient la tige par le centre, on produit la note fondamentale (cf. fig.1). Au quart de la longueur, on produit la première harmonique, au sixième de la longueur, on produit la seconde harmonique, au huitième de la longueur, on produit la troisième harmonique, etc. En supposant, par exemple, que la tige mesure environ 1,80 m, et vu que la vitesse de propagation du son dans l'aluminium est de 5500 m/s, la fréquence fondamentale est d'environ 1500 Hz. Avec un peu d'entraînement, il est possible de produire des sons relativement forts et qui durent assez longtemps (jusqu'à 1 minute). Il est intéressant de montrer qu'il est nécessaire de tenir la tige à certaines positions privilégiées pour pouvoir émettre un son. Si l'on tient la tige à un endroit quelconque, aucune onde stationnaire ne pourra s'y installer.

Variante :

Une manière de faire qui nécessite encore moins de matériel consiste à frapper une des extrémités de la tige avec un marteau, tout en maintenant cette dernière à mi-longueur, au quart de la longueur, ... comme indiqué ci-dessus (cf. fig.2). On constate dans ce cas que les résultats sont meilleurs si l'on utilise des tiges pleines.

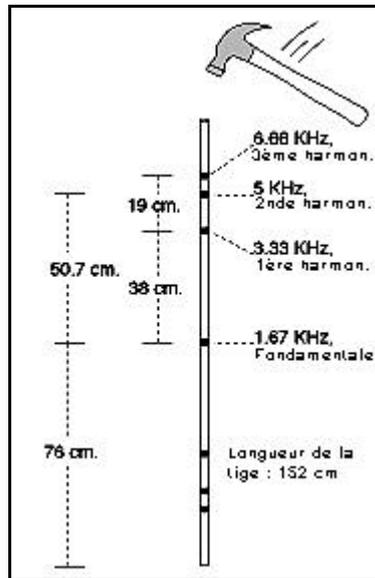


Fig. 2 : On peut aussi faire vibrer la tige en frappant une de ses extrémités avec un marteau. On a représenté les différentes positions correspondant à la fondamentale et aux premières harmoniques.

Application : détermination de la vitesse du son dans l'aluminium

Si on parvient à connaître, par exemple, la fréquence de la fondamentale émise par la tige, on peut calculer la vitesse de propagation du son dans l'aluminium, vu que l'on peut mesurer la longueur d'onde correspondante (le double de la longueur de la tige, dans ce cas précis).

On peut déterminer la fréquence fondamentale en utilisant un micro relié à un oscilloscope. Une autre technique consiste à utiliser le tube de Kundt (voir cette expérience). On fixe alors un petit disque à une extrémité de la tige, que l'on introduit dans le tube de Kundt (cf. fig.3). Dès que l'on fait vibrer la tige métallique, la poudre se répartit sous l'action des vibrations du disque de manière telle que l'on peut visualiser les ventres et les nœuds de vibration de l'onde stationnaire. On peut dès lors mesurer la longueur d'onde de celle-ci et en calculer la fréquence, en utilisant la valeur de la vitesse du son dans l'air (se référer éventuellement aux tables).

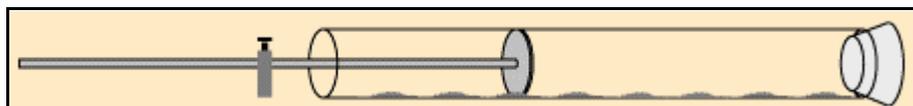


Fig. 3 : Représentation schématique de la tige d'aluminium munie d'un disque à l'une de ses extrémités et introduite dans le tube de Kundt.

Tubes ouvert et fermé

But de la manipulation :

Montrer la résonance des ondes stationnaires dans les tubes fermés et ouverts.

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : 2 tubes métalliques identiques, l'un étant muni d'un bouchon (facultatif) (cf. fig.1).



Fig. 1 : Tubes ouvert et fermé

Mode opératoire : souffler dans chacun des deux tubes.

Observations : la fréquence du son émis par le tube fermé est approximativement la moitié de celle du son émis par le tube ouvert. En réalité, à cause d' « effets de bord » qui s'appliquent à l'extrémité ouverte d'un tube, le rapport de fréquence est légèrement inférieur à une octave.

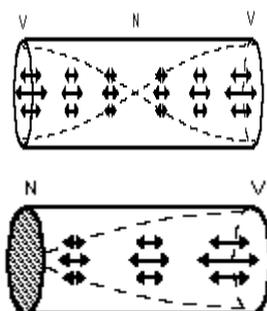


Fig. 2 : Représentation schématique d'un tube ouvert (au-dessus) et d'un tube fermé (en dessous). Les lettres N et V indiquent respectivement la position des nœuds et des ventres.

Tubes sifflant

But de la manipulation :

Produire des ondes stationnaires dans un tube ouvert et montrer le phénomène de résonance.

Introduction :

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : un ou plusieurs tuyaux flexibles (cf. fig.1).

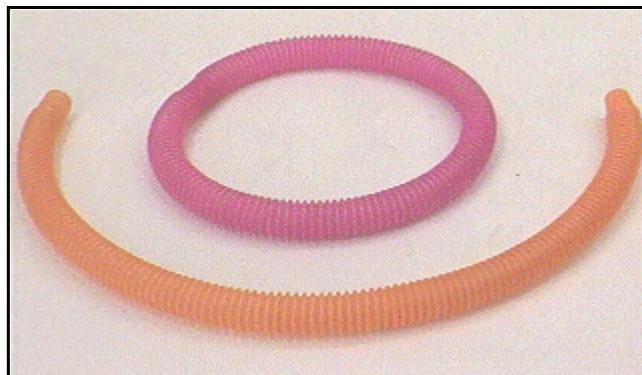


Fig. 1 : *Exemple de tubes sifflant*

Mode opératoire : tenir le tuyau par une extrémité en s'assurant que l'air peut y pénétrer ; le faire tourner. Recommencer l'expérience en augmentant progressivement la vitesse de rotation du tuyau.

Observations : on peut produire jusqu'à 7 harmoniques, correspondant à une gamme en musique. La fréquence de résonance fondamentale peut être obtenue en soufflant doucement dans le tuyau.

La tasse de thé.

But de la manipulation :

Montrer l'existence d'ondes stationnaires circulaires.

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : une tasse – une cuillère à café (cf. fig.1).



Fig. 1 : *Matériel nécessaire.*

Mode opératoire : frapper la tasse à l'aide de la cuillère à différents endroits comme indiqué à la figure 2.

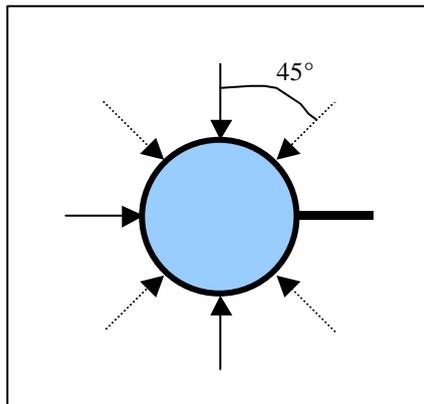


Fig. 2 : *Représentation schématique des différentes positions privilégiées (la tasse est vue du dessus, la anse est à droite). Les flèches en trait continu et discontinu indiquent les points ayant le même statut (nœud ou ventre de vibration).*

Observations : le son paraît plus aigu à certains endroits, en l'occurrence les flèches discontinues.

Interprétation : l'onde stationnaire circulaire produite par le choc de la cuillère consiste en 4 ventres et 4 nœuds alternativement séparés de 90° tout autour de la tasse (cf. fig.3). Si la anse de la tasse se situe à un ventre, la fréquence de résonance est plus basse que si la anse se situe à un nœud parce que la masse vibrante est plus grande, or la force de rappel est identique. En frappant la tasse à intervalles constants de 45° , on obtient alternativement des fréquences plus hautes et plus basses.

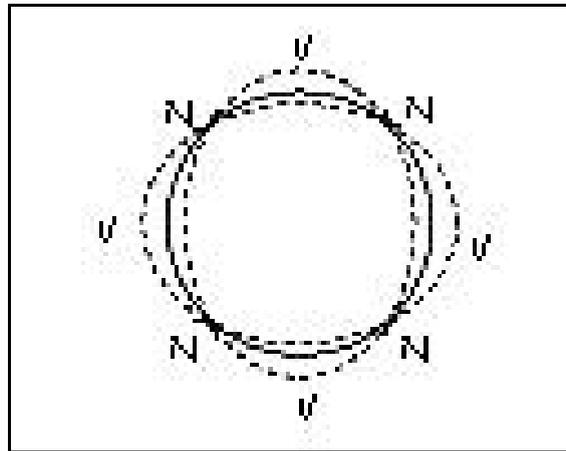


Fig. 3 : Représentation schématique des nœuds et ventres de vibration de l'onde stationnaire circulaire.

Variante :

On peut également visualiser les nœuds et les ventres des ondes stationnaires circulaires en faisant résonner un verre rempli d'eau. On frotte le bord de celui-ci avec un doigt humecté. Dès que le son se fait entendre, on observe que de petites rides régulièrement espacées se forment à la surface de l'eau en contact avec la paroi du verre. Les ventres et les nœuds tournent en même temps que le doigt parcourt le bord circulaire du verre.

L'effet « chocolat chaud »

But de la manipulation :

Mettre en évidence l'influence de la vitesse du son sur les ondes stationnaires.

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : un bécher – du sel de cuisine – une cuillère à café – de l'eau chaude.

Mode opératoire : remplir d'eau chaude le bécher. Frapper celui-ci par dessous et à intervalles réguliers à l'aide de la cuillère ; écouter le son ainsi produit. Remplir maintenant le récipient de sel, tout en continuant à le frapper avec la cuillère (cf. fig.1).



Fig. 1 : Au moment où on verse le sel dans l'eau chaude, le son perçu devient plus grave.

Observations : le son que l'on perçoit devient plus grave lorsque l'on verse le sel dans le récipient. Après quelques instants, cet effet disparaît complètement.

Interprétation : le son que nous entendons est le résultat des impulsions qui se propagent et se réfléchissent dans le récipient (cf. fig.2). Nos oreilles interprètent les impulsions individuelles comme un son. La fréquence de ce son est égale au nombre de fois par seconde que les ondes dans l'eau sont réfléchies par la surface.

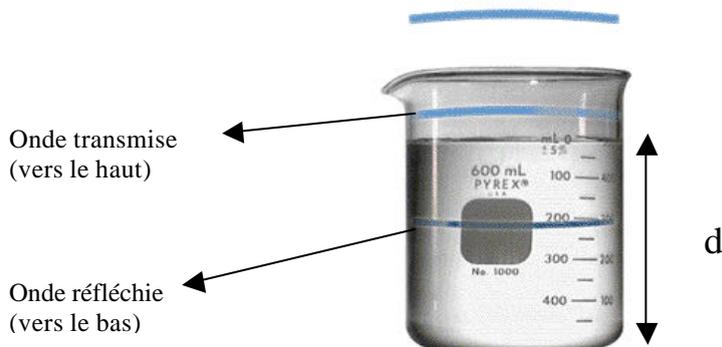


Fig. 2 : Représentation des ondes transmises et réfléchies par la surface de l'eau (on suppose que le récipient est frappé par le dessous ; toutes les ondes incidentes se dirigent vers le haut).

L'addition de sel à l'eau chaude force des milliers de minuscules bulles à se former. Ces bulles réduisent de manière drastique l'élasticité du fluide parce que l'air est plus compressible que l'eau. La vitesse du son dans cette eau salée diminue significativement, ce qui entraîne une diminution de la fréquence f du son. En effet, celle-ci vaut $f = 1/\Delta t$. Or, $\Delta t = 2d/v_s$ (où v_s est la vitesse du son dans l'eau), donc $f = v_s/2d$.

Lorsque les bulles d'air éclatent à la surface, l'eau revient à son état initial et le son perçu redevient plus aigu.

Le tube de Kundt

But de la manipulation :

Montrer la formation d'ondes stationnaires longitudinales dans l'air. Déterminer la vitesse de propagation du son dans les métaux.

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : un tube en verre fermé à l'une des extrémités et monté sur un support – un haut-parleur – un générateur à fréquence variable – de la poudre très fine (poudre de lycopode, farine, ...).

Mode opératoire : répartir de manière égale une fine couche de poudre à l'intérieur du tube. Placer le haut-parleur relié au générateur en face de l'extrémité ouverte du tube (cf. fig.1). Faire varier la fréquence du son émis et observer le comportement de la poudre à l'intérieur du tube.

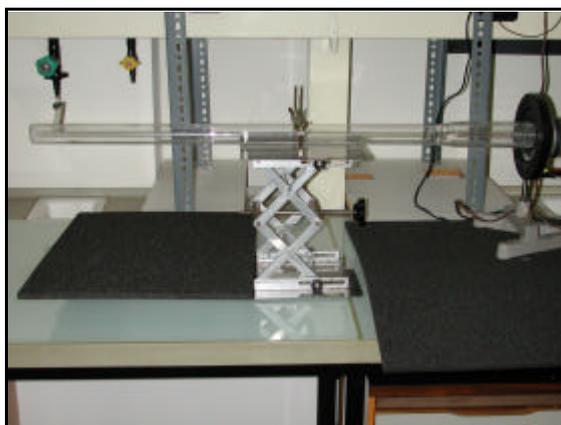


Fig. 1 : Photo de l'expérience.

Observation : pour certaines fréquences, correspondant aux différents modes de vibration du tube, on observe que la poudre s'accumule préférentiellement aux nœuds de vibration. Il est ainsi possible de déterminer la longueur d'onde émise par le haut-parleur. On vérifie très facilement que plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde diminue.

Application à la détermination de la vitesse du son dans les métaux :

Il est possible d'utiliser le tube de Kundt pour déterminer la vitesse du son dans les métaux. Pour ce faire, il faut remplacer le haut-parleur mentionné dans le montage ci-dessus par une tige métallique (se reporter à l'expérience « Tubes d'aluminium » convient parfaitement). Il est nécessaire de fixer un petit disque à l'une des extrémités de cette tige. On introduit alors la tige dans le tube de Kundt. Avec un chiffon enduit de colophane, on frotte la tige en la maintenant fermement au centre. Celle-ci se met alors à vibrer longitudinalement. Les vibrations sont transmises au petit disque et ont pour effet de produire un son à l'intérieur du tube. La poudre se répartit suivant les ventres et les nœuds comme décrit ci-dessus. On peut déterminer la longueur d'onde du son émis par la tige en mesurant directement l'espacement entre les ventres ou les nœuds (attention, la distance entre deux nœuds ou deux ventres

successifs représente la moitié de la longueur d'onde que l'on cherche). Connaissant la vitesse du son dans l'air, on peut déduire la fréquence de vibration de la tige. En mesurant la longueur de la tige, on détermine alors la moitié de la longueur de l'onde sonore produite dans la tige. Il est alors aisé de calculer la vitesse du son dans l'aluminium en appliquant la relation $v = \lambda f$.

Résonance d'une colonne d'air

But de la manipulation :

Mettre en évidence le phénomène de résonance dans une colonne d'air. Déterminer la vitesse du son dans l'air.

Description de l'expérience :

Matériel nécessaire : un tube en verre (~ 50 cm) – de l'eau – un diapason (on peut également utiliser un haut-parleur relié à un générateur à fréquence variable) – un marteau en caoutchouc – une latte – un statif.

Le montage expérimental présenté à la figure 1 possède en plus un système constitué d'un récipient relié à la base du tube par un tuyau en caoutchouc. Ceci permet, grâce au principe des vases communicant, d'ajuster plus facilement le niveau d'eau dans le tube en verre.



Fig. 1 : Montage expérimental

Mode opératoire : Frapper le diapason avec le marteau en caoutchouc (cf. fig.2) afin de le faire vibrer. Remplir d'eau le tube en verre jusqu'à l'établissement d'une onde stationnaire (résonance du diapason).



Fig. 2 : Etablissement d'une onde stationnaire à partir de la résonance du diapason.

A l'aide de la latte, mesurer la hauteur de la colonne d'air. Comme celle-ci est fermée à une extrémité (la surface de l'eau), les résonances se produisent pour les longueurs $\lambda/4$, $3\lambda/4$, $5\lambda/4$, ... (cf. fig.3).

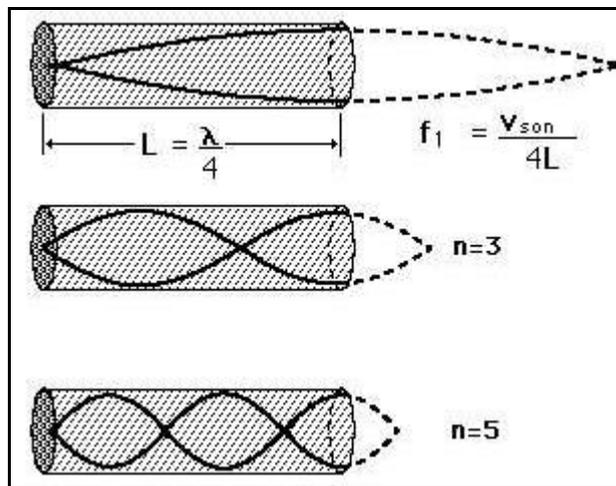


Fig. 3 : Représentation schématique des premières harmoniques qui peuvent s'installer dans un tube fermé à l'une des extrémités.

Cette manipulation permet de déterminer la longueur d'onde du son émis par le diapason. Connaissant sa fréquence (donnée par le fabricant), on peut calculer la vitesse du son dans l'air au moyen de la relation simple suivante :

$$v = \lambda f$$

où v représente la vitesse de propagation du son, λ sa longueur d'onde et f sa fréquence.

Phénomène de résonance dans un tube

But de la manipulation :

Montrer le phénomène de résonance dans un tube acoustique fermé.

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : une carafe d'eau – un grand cylindre gradué (cf. fig.1).

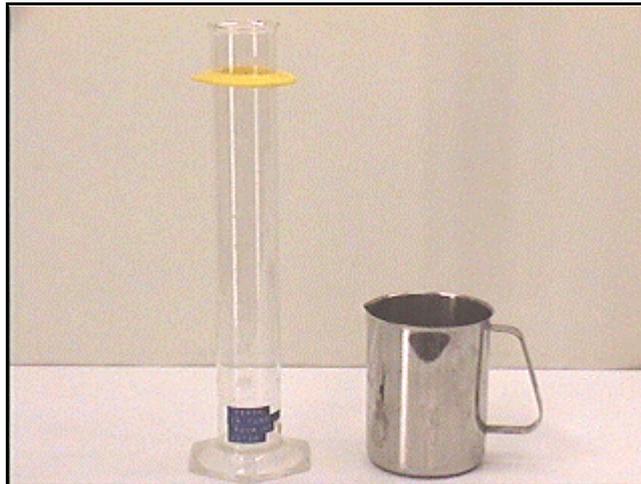


Fig. 1 : *matériel nécessaire.*

Mode opératoire : verser l'eau dans le cylindre.

Observations : la fréquence du son que l'on entend en remplissant le tube augmente au fur et à mesure que le niveau d'eau monte (c'est-à-dire que la colonne d'eau devient de plus en plus courte).

Les diapasons et le phénomène de résonance

But de la manipulation :

Mettre en évidence le phénomène de résonance à l'aide de plusieurs diapasons.

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : plusieurs diapasons (dont deux identiques) munis de leur caisse de résonance et de leur cavalier – un marteau en caoutchouc – un statif – du fil à coudre – une petite sphère en frigolite – une aiguille – un générateur à fréquence variable – un amplificateur – un haut-parleur.

Mode opératoire :

1^{ère} expérience : un diapason peut en général être monté sur une caisse de résonance qui permet d'amplifier le son qu'il émet. Cette caisse de résonance, de forme parallélépipédique, est souvent accordée sur $\lambda/4$ (cf. fig.1). Il est intéressant de montrer, d'une part, l'efficacité de ce dispositif lorsqu'il est utilisé avec le bon diapason et, d'autre part, qu'il est incapable d'amplifier le son émis par d'autres diapasons.

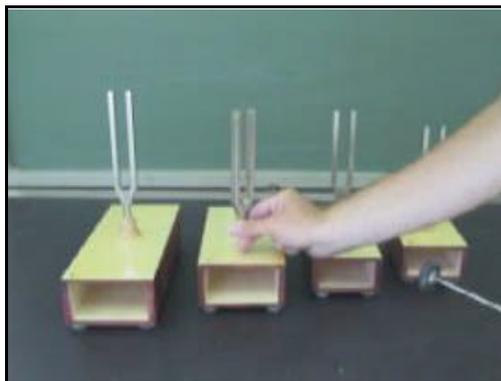


Fig. 1 : A chaque diapason correspond une caisse de résonance de longueur $\lambda/4$. Chacune de ces caisses est fermée à l'arrière (nœud de vibration) et ouverte à l'avant (ventre de vibration).

On peut également faire le parallèle avec la résonance d'une colonne d'air (cf. fig.2) et montrer ainsi que seule la longueur de cette colonne détermine sa fréquence propre, et pas sa forme ou la taille de son diamètre.

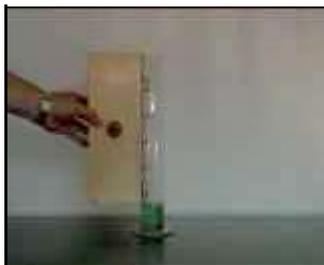


Fig. 2 : Correspondance entre la caisse de résonance et la colonne d'air associées à un même diapason.

2^{ème} expérience : deux diapasons identiques sont montés respectivement sur leur caisse de résonance et placés l'un en face de l'autre (cf. fig.3). A l'aide du marteau en caoutchouc, on fait vibrer l'un des deux diapasons. Si on stoppe la vibration de ce diapason avec les doigts, le son subsiste ! C'est en fait l'autre diapason qui s'est mis à vibrer. En effet, deux diapasons identiques possèdent la même fréquence propre. Le premier diapason joue donc le rôle « d'excitateur », tandis que le second joue le rôle de « résonateur ».

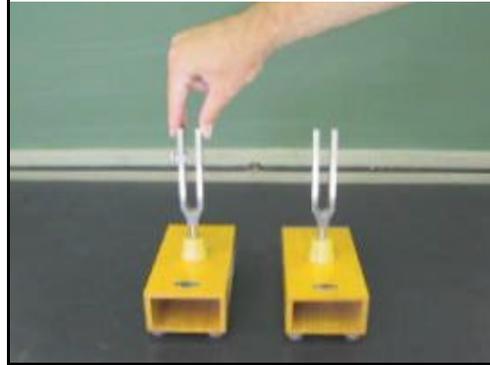


Fig. 3 : Deux diapasons identiques peuvent être successivement « excitateur » et « résonateur ».

Si on fixe maintenant un cavalier à l'un des deux diapasons, la fréquence propre de celui-ci va changer. Le second n'entrera plus en résonance avec lui et le son ne sera plus prolongé.

Variantes :

1) Il est possible de mettre en évidence la vibration du second diapason (le résonateur) de manière visuelle, en utilisant le dispositif décrit à la figure 4. Dès que les branches du diapason se mettent à vibrer, le pendule constitué de la sphère en frigolite se met à osciller.

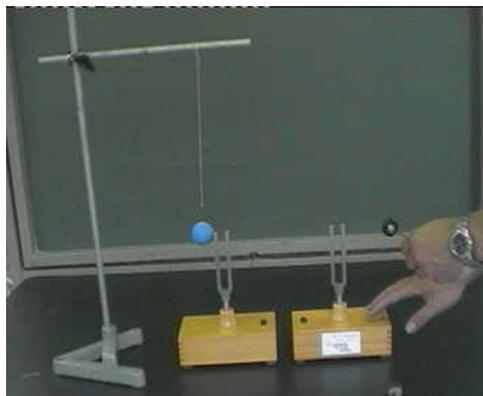


Fig. 4 : Un dispositif original pour détecter la vibration du second diapason.

2) On peut également mettre un diapason en résonance à l'aide d'un haut-parleur relié à un générateur (cf. fig.5). On vérifiera ainsi l'accord entre la fréquence de résonance indiquée par le générateur et celle donnée par le fabricant.

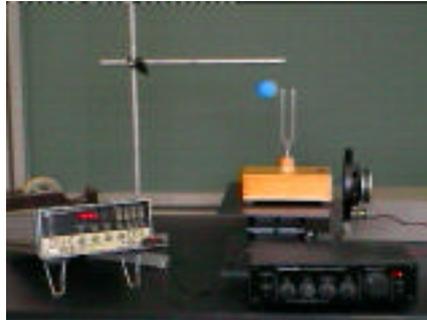


Fig. 5 : Mise en résonance d'un diapason via un système extérieur (haut-parleur branché à un générateur à fréquence variable).

Le tube de Rijke

But de la manipulation :

Montrer de manière spectaculaire la résonance dans un tube ouvert. Illustrer les ondes stationnaires.

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : un tube métallique, en verre ou en plexiglas d'environ 1m de long et d'une dizaine de cm de diamètre – un bec bunsen – des allumettes – un treillis métallique – éventuellement : une boucle de serrage métallique, une tige filetée, une perceuse, 2 écrous.

Mode opératoire : découper le treillis métallique de façon à obtenir plusieurs disques que l'on peut insérer dans le tube. Placer ces disques (nous en avons utilisé trois) superposés à environ un quart de la longueur du tube. Si vous n'arrivez pas à les coincer dans le tube, il sera nécessaire d'utiliser une boucle de serrage métallique. Vous pouvez aussi essayer de maintenir le treillis à l'aide de vis. Maintenez le tube de Rijke au-dessus d'un bec bunsen et chauffez la grille au rouge. Eloignez le tube de la flamme et écoutez.

Variante : il est parfois fastidieux de mettre au point le tube de Rijke de cette manière, c'est pourquoi nous proposons une technique un peu plus facile. Percez vos grilles en leur centre et fixez-les sur une tige filetée à l'aide de deux écrous (cf. fig.1). Chauffez au rouge les grilles dans la flamme d'un bec bunsen. Introduisez alors doucement vos grilles dans le tube jusqu'à ce qu'un son puissant et continu se fasse entendre. Ceci devrait se produire lorsque les grilles arrivent à environ un quart de la longueur totale du tube (cf. fig2).

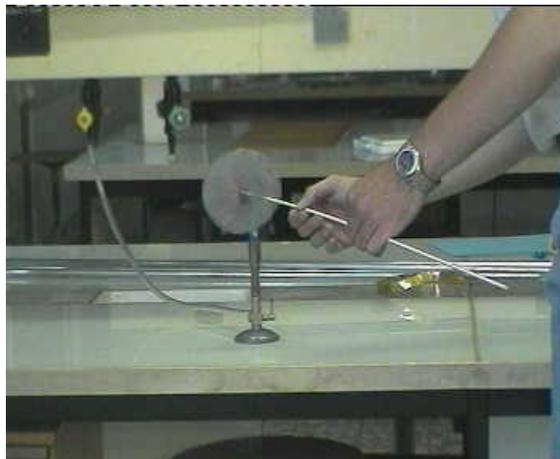


Fig. 1 : Une autre façon de faire : fixer les grilles sur une tige filetée.



Fig. 2 : Les grilles chauffées au rouge et montées sur la tige filetée sont peu à peu introduites dans le tube. A environ un quart de la longueur du tube, un son puissant se fait entendre.

Observations : Lorsque la grille est chauffée au rouge, le tube de Rijke émet un son assez puissant et durable. Il est intéressant de remarquer que ce son disparaît lorsqu'on oriente le tube horizontalement et qu'il réapparaît aussitôt qu'on l'a remis en position verticale. Après quelques instants, la grille refroidit et le son disparaît définitivement. Remarquons qu'il est également possible de produire un phénomène de battement à l'aide de deux tubes de Rijke de tailles légèrement différentes.

Interprétation : L'air chauffé au voisinage de la grille se dilate brusquement et monte, créant ainsi une perturbation au sein du tube. Le système se met à osciller et résonne à la fréquence fondamentale du tube. Si celui-ci est placé horizontalement, l'air chaud ne parcourt plus le tube suivant sa longueur. Aucun son n'est dès lors émis. Il en est de même si on obstrue l'une des deux extrémités du tube.

Un phénomène de résonance poussé à l'extrême

But de la manipulation :

Montrer que le phénomène de résonance peut avoir des conséquences inattendues ; nous montrons ici comment faire vibrer un verre de manière surprenante à l'aide d'ondes sonores !

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : un verre à parois fines (de préférence) – un générateur à fréquence variable – un amplificateur (environ 40 W) – un haut-parleur (attention : celui-ci doit pouvoir résister au signal amplifié !) – un tube « accordé » - un stroboscope – 3 petits cubes en frigolite qui feront office de supports.



Fig.1 : Photo du montage expérimental. Nous avons relié le haut-parleur (à droite) au verre (à gauche) par un tube en plexiglas « accordé » à $3\lambda/4$. Le verre est installé sur 3 petits supports en frigolite.

Mode opératoire : Le principe de cette expérience est très simple : faire vibrer un verre en lui envoyant des ondes sonores à sa fréquence propre.

La détermination très précise (au Hertz près !) de la fréquence de résonance du verre est une condition nécessaire à la réussite de l'expérience. La technique la plus simple utilisée consiste à humecter un doigt et le frotter sur le bord du verre afin de produire un son pur et harmonieux. La fréquence de ce son correspond exactement à la fréquence de résonance du verre. Il faut alors ajuster le générateur à fréquence variable de manière à ce qu'il coïncide **parfaitement** avec la fréquence de résonance du verre. Pour ce faire, il faut l'oreille musicale, ou utiliser d'autres techniques. L'idéal est de disposer d'un logiciel permettant de faire une analyse de Fourier. On détermine alors aisément la fréquence de résonance du verre, qu'il suffit alors de produire à l'aide du générateur à fréquence variable. Certains auteurs mentionnent aussi une autre méthode : brancher un micro sur un oscilloscope ; le placer près du verre, à 90° par rapport au haut-parleur et comparer sur l'oscilloscope le signal reçu par le micro et le signal émis par le générateur tout en balayant très doucement en fréquence. A la résonance, on observe une grande augmentation du signal reçu par le micro, ainsi qu'un changement de phase de 90° .

Une fois que l'on se trouve à la fréquence de résonance du verre, on peut augmenter progressivement la puissance de l'amplificateur et observer la vibration du verre à l'aide d'un

stroboscope. Il est possible de faire vibrer le verre jusqu'à ce qu'il se rompe, à condition de disposer d'une source sonore très puissante. Dans ce cas, il est bien entendu recommandé de prendre toutes les mesures de sécurité qui s'imposent...

Nous avons utilisé, dans notre montage expérimental, une astuce permettant de compenser notre manque de puissance sonore. En effet, en plaçant un tube de même diamètre que le haut-parleur et accordé à $3\lambda/4$ entre la sortie du haut-parleur et le verre, ce dernier se trouve à un ventre de vibration de l'onde stationnaire qui s'installe dans le tube (cf. fig.1). Cette technique permet de « rentabiliser » au maximum son amplificateur et d'obtenir des résultats bien plus convaincants !

Observations : A l'aide du stroboscope, on observe très facilement que le bord du verre se déforme. Certains points sont fixes – les nœuds de vibration – tandis que d'autres pas – les ventres de vibration. 4 nœuds et 4 ventres se succèdent sur la circonférence. On peut mettre également en évidence l'importance d'être parfaitement à la fréquence de résonance pour observer les effets susmentionnés. Un léger décalage en fréquence (ne fût-ce qu'un Hz !) et le phénomène disparaît, même si on dispose d'un puissant amplificateur !

Phénomène de résonance à partir de bruit blanc

But de la manipulation :

Montrer qu'il est possible de filtrer une gamme de fréquences d'un bruit blanc.

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : lecteur de cassette – un enregistrement de bruit blanc (par exemple, le bruit de fond émis par une cassette usagée) – un tube en acier – un tube en carton pouvant glisser sur le tube en acier.

Mode opératoire : mettre en marche le lecteur de cassette ; placer les deux tubes emboîtés l'un dans l'autre sur le haut-parleur de la machine ; faire coulisser le tube extérieur (cf. fig.1).

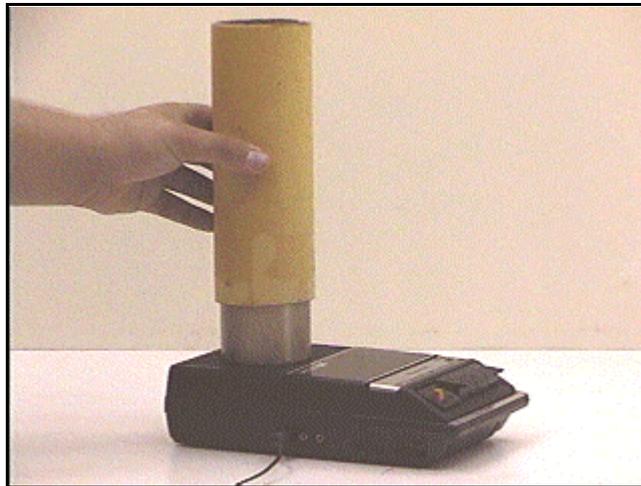


Fig.1 : Dispositif expérimental.

Observations : Lorsque la longueur du tube augmente, on observe que le son perçu a une fréquence de plus en plus basse.

Le radar acoustique

But de la manipulation :

Illustrer le principe de fonctionnement du SONAR.

Introduction :

Le son se propageant très bien dans l'eau, les bateaux utilisent des échos sonores pour dresser la carte du fond des océans. Les ondes sonores sont réfléchies par le fond, et la profondeur est estimée par le sondeur à partir du temps mis par l'écho pour revenir au bateau. Le sonar peut de la même façon repérer sous l'eau aussi bien les bancs de poisson que les sous-marins ennemis. Il envoie des faisceaux d'ultrasons et en analyse l'écho (cf. fig.1).

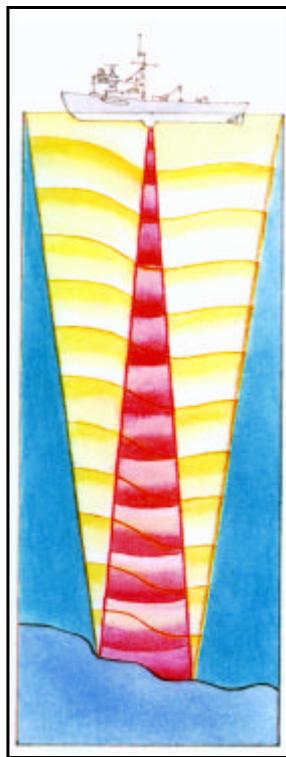


Fig. 1 : Principe du SONAR

Description de la manipulation :

Matériel nécessaire : haut-parleur – micro – générateur à fréquence variable – écran (plaque métallique) – oscilloscope.

Mode opératoire : Le générateur émet de courtes impulsions sonores à basse fréquence ; celles-ci, réfléchies par l'écran, sont captées par le micro placé sur le haut-parleur (cf. fig. 2).

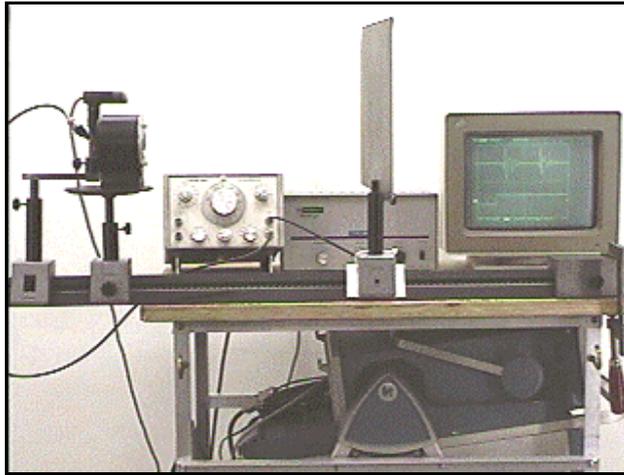


Fig. 2 : Exemple de RADAR acoustique

A l'aide de l'oscilloscope, on peut mesurer le retard entre le signal émis et le signal reçu (ce retard croît bien entendu avec la distance séparant l'émetteur de l'obstacle). Connaissant la vitesse de propagation du son dans l'air, il est alors possible de déterminer la distance de l'obstacle.

La voix humaine

But de la manipulation :

Décrire simplement le système vocal humain. Expliquer pourquoi la voix devient plus aiguë lorsqu'on inhale de l'hélium.

Description de la manipulation :

En première approximation, le système vocal humain peut se modéliser par un excitateur, les cordes vocales, et trois résonateurs, les cavités pharyngale et buccale « placées en série », et la cavité nasale « en parallèle », activable ou non selon le type de sons produit (cf. fig.1).

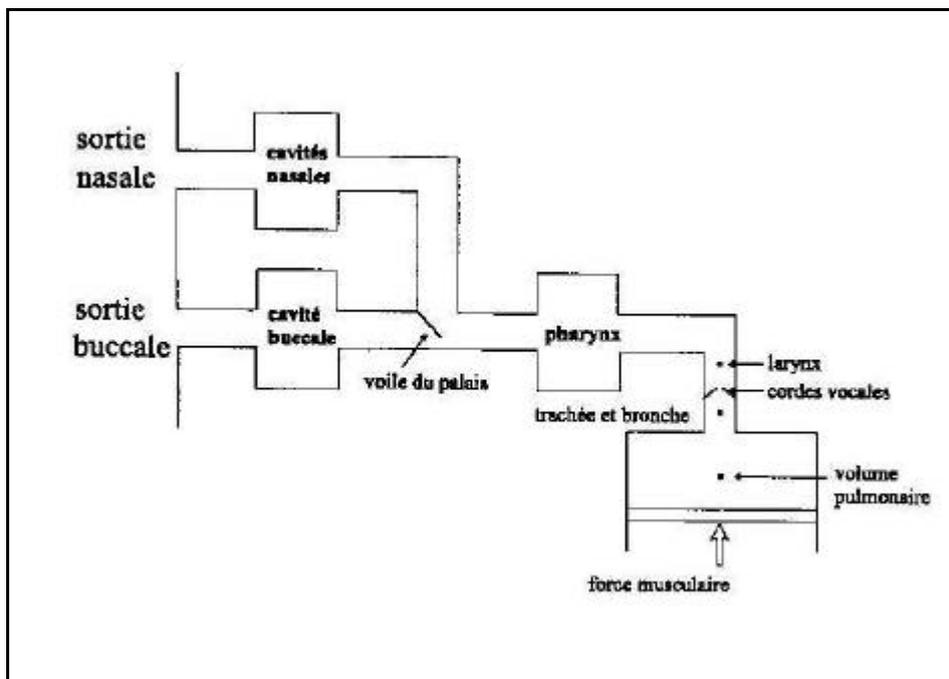


Fig. 1 : modèle du système vocal humain.

Les cordes vocales sont constituées de deux membranes mobiles capables de vibrer de façon assez complexe suite au passage de l'air en provenance des poumons. Ainsi, un très grand nombre d'ondes de fréquences différentes vont traverser les cavités résonantes. Ces dernières amplifieront, parmi le flux de vibrations sonores, celles dont les fréquences correspondent à leurs propres fréquences de résonance. Autrement dit, seules les ondes pouvant donner lieu à des ondes stationnaires dans l'une de ces cavités seront amplifiées. L'éventail des fréquences propres du système est très grand, puisqu'une cavité comme la bouche présente une « géométrie variable », capable d'adopter un très grand nombre de configurations différentes.

Avec un dispositif expérimental adapté, les spécialistes peuvent notamment étudier l'évolution temporelle d'un son. Une analyse de Fourier leur permet de visualiser le spectre des fréquences amplifiées lors de la prononciation de différents sons. Ainsi, les voyelles

apparaissent comme des sons périodiques, et leur décomposition spectrale fait apparaître deux groupes de fréquences, appelés « formants », qui correspondent aux ondes amplifiées par les deux premières cavités résonnantes, le pharynx et la bouche ; l'influence de la cavité nasale est quant à elle plus subtile, et son étude nécessiterait des investigations plus poussées.

Changer de gaz, changer de voix

La voix de quelqu'un qui inhale de l'hélium devient plus aiguë. Cet effet est dû à un phénomène de résonance, sans doute plus simple à comprendre à propos d'un sifflet.

Lorsque l'on souffle dans un sifflet de « scout », une onde stationnaire s'établit entre son extrémité fermée (nœud de vibration) et le trou du sifflet (ventre de vibration). Le son est produit par la vibration du ventre. La longueur d'onde (λ) du sifflement est imposée par la longueur de la colonne d'air vibrante, c'est-à-dire par la longueur du sifflet. La hauteur (f) du son va donc dépendre de la vitesse de propagation (v) du signal sonore par la formule $f = v/\lambda$. Le son se propageant plus vite dans l'hélium que dans l'air, le sifflement sera plus aigu pour un sifflet rempli d'hélium.

De la même manière, les fréquences de résonance d'une cavité buccale dépendent de la vitesse du son dans le gaz qui emplit la bouche. Quand on parle, les cordes vocales émettent sur toute une gamme de fréquences. La bouche sert de cavité résonante et amplifie sélectivement certaines de ces fréquences. Les longueurs d'onde résonantes de la bouche, qui ne dépendent que de l'anatomie, ne sont pas modifiées par la présence d'hélium ; mais la vitesse du son étant plus élevée dans ce gaz que dans l'air, les fréquences amplifiées sont plus élevées que dans l'air.

Simulation et modélisation de l'imagerie par résonance magnétique

Le signal qui permet de dessiner l'image d'un organe par résonance magnétique est une onde électromagnétique produite par les microaimants naturels que sont les noyaux d'hydrogène des molécules d'eau dont tous nos tissus sont imbibés. Nous n'essayerons pas ici d'expliquer, ni même de décrire, comment fonctionnent ces microaimants.

L'onde électromagnétique produite par la rotation des microaimants et captée par une antenne a une fréquence comparable à celle des ondes radio (typiquement, la fréquence des ondes des stations émettant en fréquence modulée). Leur longueur d'onde est donc de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Cela ne pose aucun problème pour détecter ces ondes (comme pour écouter une émission de radio), mais cela pose un problème majeur si l'on souhaite localiser la zone d'émission de ces ondes : en général, la résolution associée à une onde est limitée par sa longueur d'onde. On peut donc « connaître » l'origine de l'onde électromagnétique... à une dizaine de mètres près, ce qui n'est d'aucune utilité d'un point de vue médical. Il faut donc imaginer un autre moyen de localiser l'émetteur.

Une telle proposition a été formulée il y a une vingtaine d'années, et elle s'appuie sur la localisation d'une résonance plutôt que sur la localisation de l'origine de l'onde proprement dite. L'idée de base de la nouvelle technique consiste à soumettre les petits aimants à un champ magnétique constant dans le temps mais inhomogène, c'est-à-dire variable dans l'espace, plutôt qu'à un champ uniforme, comme dans les expériences classiques de résonance magnétique. Ce champ magnétique inhomogène (B_0) est généré par deux grandes bobines situées de part et d'autre de notre système, et des aiguilles aimantées susceptibles de pivoter autour d'un axe vertical sont placées tout le long de l'axe de B_0 (cf. fig.1). Dans ces conditions, comme le feraient des boussoles, les aiguilles aimantées s'alignent sur B_0 . Si, par un moyen quelconque, on écarte une aiguille aimantée de sa situation d'équilibre alignée sur B_0 , elle se met à osciller autour de la direction de B_0 , à une fréquence qui dépend de B_0 : plus B_0 est élevé, et plus la fréquence d'oscillation l'est, exactement comme l'oscillation d'une masse entraînée par un ressort se fait plus rapide lorsque la dureté du ressort augmente.

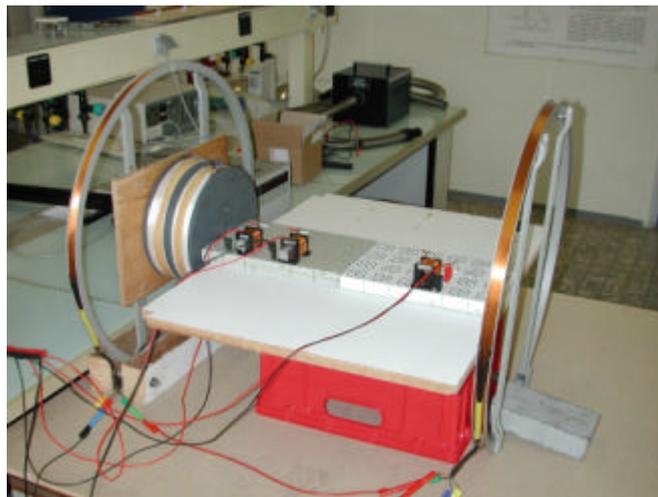


Fig. 1 : Photo du dispositif expérimental. Les grandes bobines génèrent le champ magnétique inhomogène B_0 .

D'autre part, plusieurs électroaimants alimentés par un courant alternatif de fréquence ajustable sont disposés de manière à plonger tout le système dans un champ oscillant (B_1) perpendiculaire à B_0 (cf. fig.2). L'amplitude de B_1 doit être nettement plus petite que B_0 . En général, le fait d'activer le champ B_1 ne suffit pas pour écarter considérablement les aiguilles aimantées de leur position d'équilibre alignée sur B_0 : on ne constate qu'une vibration des aiguilles. Sauf si la fréquence d'oscillation de B_1 est exactement celle à laquelle oscilleraient spontanément les aiguilles exposées au seul champ B_0 à partir d'une position initiale de déséquilibre : alors l'action de B_1 est « cumulative », comme dans toute résonance, et on voit les aiguilles se mettre à tourner de manière bien visible.



Fig. 2 : Détail des boussoles utilisées dans l'expérience. Les bobines sont alimentées par un courant alternatif et génèrent le champ oscillant B_1 orthogonal au champ B_0 .

La simulation de la technique d'imagerie est réalisée en faisant varier continûment et lentement la fréquence de l'alimentation des aimants qui produisent B_1 : partant de fréquences basses, ce sont d'abord les aiguilles situées dans une région où B_0 est faible qui s'animent, pour s'immobiliser lorsque la fréquence d'alimentation augmente, et que d'autres aiguilles situées dans une région où B_0 est élevé se mettent en mouvement. Il est donc possible d'établir une correspondance entre une région de l'espace (celle où les aiguilles tournent) et une fréquence d'alimentation. Autrement dit, en détectant un signal, on peut déduire de la mesure de sa fréquence la région de l'espace d'où il a été émis.

Remerciements :

Un grand merci au Professeur Albert ART, auteur de l'idée développée ci-dessus, et animateur de l'expérimentarium de l'ULB, où un tel montage a aussi été réalisé.