

Bibliographie :

- Quaranta tome 1 Mécanique [1]
- Duffait CAPES [2]
- Landau, Elasticité (si on veut les formules des vitesses du son dans les solides)
- Handbook (pour les vitesses tabulées)

Commentaires du Jury :

- [2011, 2010] Les phénomènes de réflexion/transmission ont aussi leur place dans ce montage. En outre, le jury apprécie qu'on ne se limite pas à la propagation dans l'air ni à une gamme de fréquences restreinte aux fréquences audibles.
- [2008, 2007] Il est conseillé de ne pas se limiter à la propagation dans l'air ni à une gamme de fréquences restreinte aux fréquences audibles.
- [2000] Le rôle de la caisse de résonance d'un diapason reste méconnu. Les fonctionnements des microphones et haut-parleurs électrodynamiques présentent des analogies, mais la force de Laplace et la loi de l'induction sont deux phénomènes physiques à propos desquels il est difficile de parler réellement de "réversibilité" - est-ce d'ailleurs si important ? L'emploi du tube de Kundt et la mise en œuvre de l'expérience de Melde donnent lieu à de surprenantes confusions entre les notions de résonance et d'ondes stationnaires la résonance, ici, ne fait que rendre plus apparent le phénomène d'ondes stationnaires : c'est pourquoi on préfère placer le haut-parleur à un nœud de pression, ce qui impose une contrainte à la fréquence du son si l'autre extrémité du tube est bouchée. Pour étudier l'influence d'un paramètre d'environnement (la température, par exemple) il est préférable de ne pas faire varier la longueur d'onde, et donc d'ajuster la fréquence. D'autres dispositifs, qui ne fixent qu'une seule condition aux limites, sont d'emploi plus aisé.
- [1996] Le montage sur les ondes sonores et ultrasonores est souvent traité sur des types trop restreints d'expériences. La notion d'impédance acoustique est souvent méconnue et les phénomènes de réflexion-transmission peu abordés.

Plan (tout à fait équilibré) :

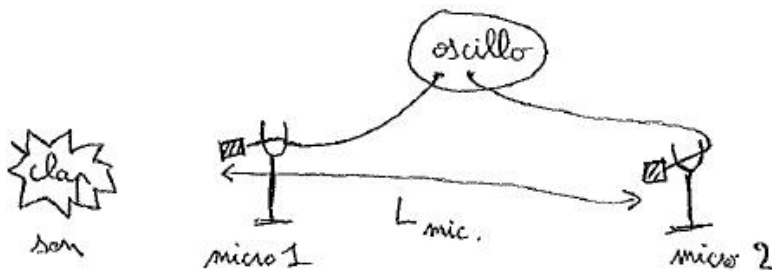
- I) Caractère propagatif des ondes sonores, vitesse du son.
 - 1) Propagation dans l'air et dépendance en température de la vitesse du son : tube de Kundt ([1] et [2])
 - 2) Propagation dans un liquide et un solide
- II) Caractère ondulatoire des ondes sonores.
 - 1) Interférences : trombone de Kœnig ([1] ou [2])
- III) Impédances, réflexions, transmissions et toutes ces sortes de choses.
 - 1) Cloche à vide

Pour une fois, je pense qu'on peut dire en toute bonne foi : « de tout temps, les hommes ont entendu des sons ». Ce qui ne veut pas dire qu'il s'est pour autant toujours intéressé aux ondes acoustiques, ce que nous allons faire aujourd'hui dans le montage 33 : ondes acoustiques. Nous allons caractériser leur propagation dans différents milieux matériels et dans différents domaines de fréquences. Puis nous réaliserons une expérience d'interférences acoustiques pour justifier leur caractère ondulatoire. Enfin, nous nous intéresserons à une expérience illustrant le rôle de l'impédance acoustique dans la réflexion et la transmission à l'interface entre deux milieux.

I) Caractère propagatif, vitesse du son.

1) Propagation dans l'air et dépendance en température de la vitesse du son : tube de Kundt.

Une première expérience très simple consiste à relier deux microphones à un oscilloscope et à les placer à une distance différente d'une source sonore, par exemple, un claquement de main (ou quelque chose de plus reproductible si vous préférez). On observe un retard du signal reçu sur le microphone le plus éloigné par rapport au signal du microphone le plus proche de la source. Il y a un délai dû à la propagation à vitesse finie du son. C'est le même phénomène qui explique pourquoi lorsqu'on regarde un feu d'artifice on observe les explosions avant de les entendre (ce qui n'est pas dû à un mauvais doublage comme c'est le cas dans de nombreuses séries télévisées), la vitesse du son dans l'air étant largement inférieure à celle de la lumière.



Nous pouvons exploiter quantitativement ce résultat pour faire une première mesure de la vitesse du son dans l'air, à température et pression ambiante :

On mesure la distance entre les deux micros, $L_{mic} =$

On mesure le temps de propagation à l'oscilloscope, $T =$

D'où, par un calcul savant, une vitesse $C_{air} =$

On peut la comparer à la vitesse théorique dans l'air à 20°C : $C_{air}^{théorique} = 343,4 \text{ m.s}^{-1}$

Nous allons maintenant étudier un peu plus en détail la dépendance en température de la vitesse du son dans l'air.

Dans le modèle du gaz parfait, la vitesse du son est donnée par la formule :

$$C_{gaz} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

Où : $R \approx 8,341 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ est la constante des gaz parfaits.

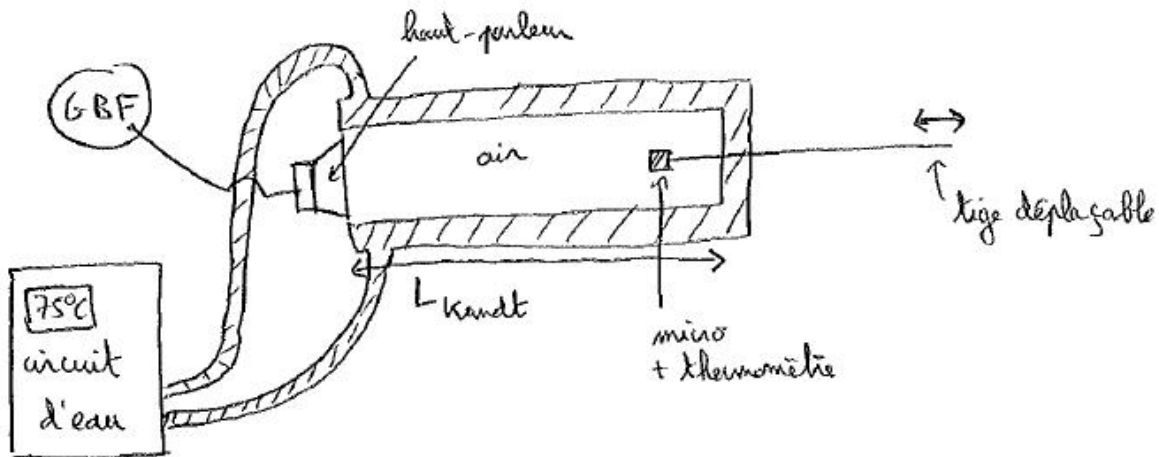
T est la température en Kelvin.

$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ est le rapport des capacités thermiques à pression et à volume constants, avec

$\gamma = 1,4$ pour le gaz parfait diatomique.

M est la masse molaire du gaz, avec $M \approx 28,97 \text{ g.mol}^{-1}$ pour l'air.

C'est cette relation que nous allons tenter de vérifier à l'aide du tube de Kundt :



On dispose d'un tube rempli d'air, fermé par un bouchon à une extrémité, et par un haut-parleur alimenté par un générateur basse fréquence, à l'autre extrémité. Un circuit d'eau permet de thermostatier le tube à une température de consigne. Un petit microphone et un thermomètre sont positionnés sur une tige que l'on peut déplacer au sein du tube, et qui nous permettent d'avoir accès à la température et à la pression en différents points. Les conditions aux limites imposent la mise en place d'un système d'ondes stationnaires dans le tube. De plus, on a résonance, lorsque la longueur d'onde de l'onde acoustique dans le milieu (en l'occurrence l'air) correspond à l'une des valeurs données par la longueur totale du tuyau L_{Kundt} :

$$\lambda_n = \frac{2L_{Kundt}}{(n + 1/2)}$$

Avec n un entier naturel.

Lors de la résonance, on a un ventre de pression au niveau du bouchon, et un nœud de pression au niveau du haut parleur.

Pour étudier la dépendance en température de la vitesse du son, on se place à une fréquence de résonance (en repérant l'amplitude maximale du signal lorsque le micro est au niveau du bouchon). On mesure une première fois avec précision la longueur d'onde de résonance correspondante à l'aide de la distance entre deux minima successifs : cette distance est égale à la demi-longueur d'onde (on peut augmenter la précision en prenant la distance entre plusieurs minima successifs). Puis on modifie la température, et on cherche alors la fréquence qui permet de retrouver la résonance avec la même longueur d'onde. L'intérêt de cette méthode, est qu'on n'a besoin que de mesurer la fréquence avec précision et qu'on peut se contenter de vérifier rapidement que la longueur d'onde qu'on a à chaque fois correspond bien à celle qu'on avait initialement, puisque les longueurs d'onde de résonance sont relativement espacées les unes des autres.

Nous avons choisi de prendre $\lambda = 45,8 \pm 0,1 \text{ cm}$, qui correspond à une fréquence $f = 789 \pm 1 \text{ Hz}$ à 55°C .

Les longueurs d'onde voisines sont $\lambda = 35,6 \pm 0,3$ cm et $\lambda = 64,1 \pm 0,3$ cm, ce qui fait qu'il nous suffira de vérifier que la longueur d'onde que l'on mesure à la résonance vaut 46 cm à 10 cm près pour être sûr d'avoir la « bonne » résonance lorsqu'on aura changé la température.

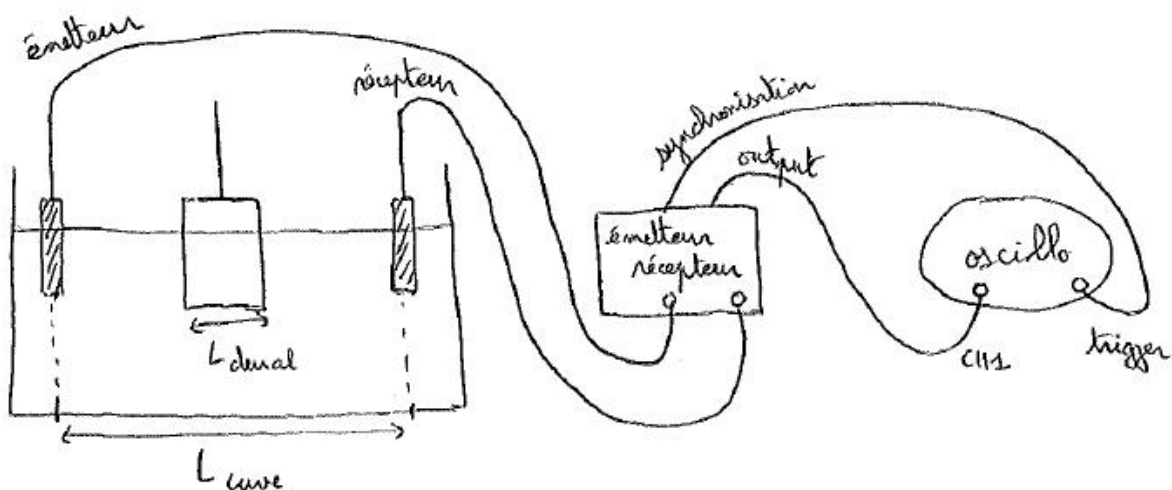
Pour différentes températures T , on mesure la fréquence f qui permet de retrouver la résonance, et on trace ensuite le carré la vitesse du son C_{air} en fonction de la température, où $C_{air}(T) = f(T) \times \lambda$. On doit obtenir une droite de pente $\frac{\gamma R}{M}$.

Ici on obtient : $\gamma =$

NB : Il est possible de faire toutes les mesures à fréquence fixée. Dans ce cas on doit mesurer la longueur d'onde obtenue à chaque température, et tracer $C_{air}(T) = f \times \lambda(T)$, mais cette méthode est a priori moins précise (car les minima sont d'autant plus difficiles à repérer qu'on s'éloigne de la résonance), et qui plus est, explicitement déconseillée par le jury de 2000.

2) Propagation dans un liquide et un solide.

On veut maintenant s'intéresser aux vitesses de propagation dans un liquide, qui sera l'eau, et dans un solide, qui sera un alliage d'aluminium : le dural !



On se sert de la cuve remplie d'eau distillée avec un émetteur et un récepteur d'ultrasons (ce qui permettra d'épargner un peu vos oreilles après le tube de Kundt), dans laquelle on peut introduire un bloc de dural.

L'émetteur/récepteur de pulses ultrasonores est relié à un oscilloscope (dont on branche le trigger sur le signal de synchronisation de l'émetteur/récepteur, pour pouvoir mesurer quelque chose sans s'embêter à chercher le signal).

Pour ne pas avoir à discuter les nombreux échos qui peuvent avoir lieu dans la cuve, on ne s'intéresse qu'au temps mis par l'onde pour arriver sur le récepteur (on mesure donc le temps qui sépare l'émission du pulse et le premier pic observé en réponse).

On mesure au préalable la longueur de la cuve, et les dimensions du bloc de dural :

$$L_{cuve} = 34,5 \pm 0,2 \text{ cm}$$

$$L_{Dural} = 4,00 \pm 0,05 \text{ cm}$$

On mesure ensuite le temps mis par l'onde pour atteindre le récepteur, d'abord en absence du bloc de dural :

$$T_{\text{sans}} =$$

D'où on déduit $C_{\text{eau}} =$ à comparer à la valeur théorique de 1480 m.s^{-1}

Puis avec le bloc de dural :

$$T_{\text{avec}} =$$

$$D'où, \text{ via la formule : } T_{\text{avec}} = \frac{L_{\text{cuve}}}{C_{\text{eau}}} + L_{\text{dural}} \left(\frac{1}{C_{\text{dural}}} - \frac{1}{C_{\text{eau}}} \right)$$

on trouve $C_{\text{dural}} =$

(on doit trouver de l'ordre de 6000 m.s^{-1} , on n'a pas de valeur précise car on ne connaît pas la composition exacte de l'alliage).

On peut faire un petit commentaire sur le fait que la vitesse du son dans le métal permet de remonter à son module d'Young connaissant sa densité. Ou si on est fan de John Wayne, on peut dire que c'est parce que le son se propage plus vite dans le métal que dans l'air que les indiens collent leur oreille sur les rails pour entendre si le train de la Western Union arrive (et pas juste parce qu'ils aiment vivre dangereusement).

NB : Pour la mesure dans le dural, qui n'est pas forcément très précise, on peut tourner le bloc de 90° pour faire une mesure dans le sens de la longueur, et obtenir une deuxième valeur de la vitesse du son. On peut aussi (si on est motivé) tenter une mesure de la vitesse des ondes de cisaillement dans le dural, mais le signal n'est pas très propre (il paraît néanmoins que la cuve de Cachan donne un signal beaucoup plus propre que la notre et que sa notice contient toutes les informations utiles, ce que nous n'avons malheureusement pas eu le loisir de vérifier).

II) Caractère ondulatoire du son

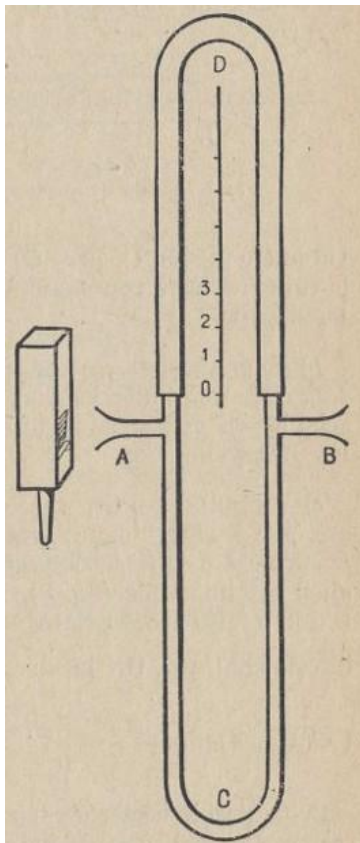
Intéressons-nous maintenant au caractère ondulatoire des ondes sonores.

Contrairement au cas de la lumière où on ne dispose que de récepteurs sensibles à l'intensité et dont le temps de réponse n'est généralement pas suffisant pour observer les oscillations (on n'a accès qu'à l'intensité moyenne et pas à l'amplitude), on peut très bien, à l'aide d'un simple microphone (qui est un récepteur linéaire), observer l'amplitude de l'onde sonore générée par un diapason par exemple (pour avoir un signal « monochromatique »). Le caractère ondulatoire du son, est donc assez facile à observer « directement ». Néanmoins, on peut aussi s'intéresser à reproduire une expérience typique des phénomènes ondulatoires : les interférences.

NB : On peut choisir de faire l'expérience de la diffraction avec les transducteurs à ultrasons à la place, ça fonctionne bien, mais on voulait éviter le risque de questions méchantes sur la diffraction, ce pourquoi on a plutôt choisi les interférences.

1) Interférences : trombone de Kœnig.

Le schéma du dispositif est le suivant :



Le son est émis en A par un haut-parleur branché sur un générateur basse fréquence. Pour avoir quelque chose de mesurable, il vaut mieux se placer à une fréquence comprise entre 1 kHz et 3 kHz (autrement dit : « là où ça va être très moche pour vos oreilles », donc pensez à vous munir d'un casque antibruit pour ne pas sombrer dans la démence).

On mesure le signal de sortie en B avec un microphone branché sur un oscilloscope.

En déplaçant la partie mobile du trombone (D) et en mesurant la distance d qui sépare deux minima successifs sur le signal obtenu, on peut remonter à la longueur d'onde, puisqu'on a alors :

$$2d = \lambda$$

où λ est la longueur d'onde de l'onde acoustique.

On mesure λ pour 3 fréquences différentes :

$f_1 =$	$\lambda_1 =$
$f_2 =$	$\lambda_2 =$
$f_3 =$	$\lambda_3 =$

On peut alors vérifier que la vitesse du son est bien toujours la même dans le tube, à l'aide de la relation $C = \lambda \times f$.

Ici on trouve :

$$C_1 =$$

$$C_2 =$$

$$C_3 =$$

III) Impédances, réflexions, transmissions et toutes ces sortes de choses.

On va essayer de s'intéresser maintenant à l'impédance acoustique Z , qui relie les deux grandeurs couplées que sont la pression P et la vitesse v au sein du fluide :

$$P = Z v$$

Pour une onde plane progressive on a :

$$Z = \rho C$$

où ρ est la masse volumique du milieu de propagation et C la vitesse de propagation du son dans le milieu.

En incidence normale sur une interface entre un milieu 1 et un milieu 2, on peut calculer les coefficients de réflexion r_{12} et de transmission t_{12} en amplitude :

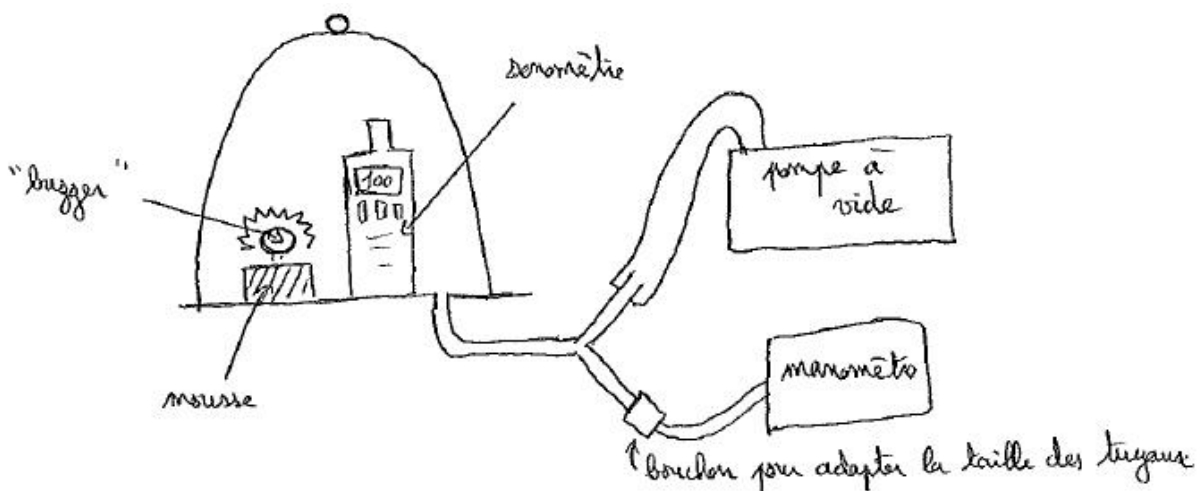
$$r_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$$t_{12} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

On va donc essayer de montrer l'importance de l'impédance avec l'expérience célèbre de la cloche à vide dans laquelle on place un vibreur qui produit un son horripilant (encore une fois le casque antibruit est fortement conseillé).

1) Expérience de la cloche à vide.

L'idée est de montrer, que lorsqu'on place un vibreur sous une cloche en verre, et qu'on réduit la pression de l'air dans la cloche à l'aide d'une pompe à vide, on n'empêche pas l'onde sonore de se propager dans le milieu raréfié mais on réduit suffisamment la différence d'impédance entre l'intérieur de la cloche et la paroi en verre pour que le son soit presque intégralement réfléchi (et donc très peu transmis).



Le protocole expérimental est le suivant :

On place le vibreur sur un morceau de mousse dans la cloche à vide, avec le sonomètre de la collection dont la taille est raisonnable (indice : ce n'est pas celui qui fait 50 cm et pèse 2 kg). On branche la pompe à vide sur l'un des deux embouts du T du plateau de la cloche à vide. On met la pompe en marche. On peut suivre l'évolution de la pression à l'aide d'un manomètre placé sur le second embout du T de la cloche à vide. On arrête la pompe lorsque la pression atteint 0,1 bar. De l'extérieur, on n'entend presque rien. On lit alors la valeur indiquée par le sonomètre.

On lit : $I =$ (en préparation on trouvait dans les 90 dB).

Pour comparaison, lorsqu'on utilise le sonomètre hors de la cloche, et alors que l'environnement n'est pas spécialement silencieux, on trouve entre 50 et 60 dB.

La conclusion est donc que le son continue bien de se propager à l'intérieur de la cloche, mais que la différence d'impédance fait qu'il n'est presque pas transmis à l'interface air raréfié/verre.

NB : Pour se ramener à des amplitudes de pression, l'intensité en décibel est de la forme $I = 20 \times \log (A/A_0)$ où A est l'amplitude de la pression et A_0 une amplitude de référence (qui correspond au seuil limite de la pression audible).

Remarques :

- Nous n'avons pas trouvé de protocole pour cette expérience, et nous avons donc tâtonné pour en trouver un pas trop délirant (il n'est donc pas garanti qu'il soit « bien »).
- Il est toujours bon de savoir que les micros survivent à leur séjour dans la cloche à vide (étant donné qu'il n'y a aucune information là-dessus dans les données constructeur, il n'était pas garanti que ça soit le cas), néanmoins aucun de ceux de la collection n'arrive à mesurer correctement l'onde sonore lorsqu'il est sous pression réduite (le problème d'adaptation d'impédance qu'on a entre le verre et l'air raréfié se retrouve entre le micro et l'air raréfié).
- Nous avons néanmoins trouvé un micro piézo-électrique qui arrive à détecter un signal sonore dans la cloche tant que la pression n'est pas trop faible. Bernard Castaing nous a dit que nous pouvions montrer que si l'amplitude du signal enregistré par le micro décroissait linéairement avec la pression, cela voulait dire que cette diminution n'était due qu'au problème d'adaptation d'impédance entre l'air raréfié et le micro. Et que c'était seulement si la décroissance était plus rapide que cela voulait dire que le son ne se propageait plus dans la cloche. Nous n'avons pas tenté de faire cette mesure (mais son principal défaut est que nous n'avons aucune référence théorique sur le comportement supposé du micro sous pression réduite).
- On met le vibreur sur de la mousse pour éviter des critiques sur le fait que l'onde sonore pourrait se transmettre au sonomètre par le fond de la cloche (qui est un support matériel) et pas par l'air raréfié. La difficulté réside alors dans le fait de faire tenir tout le matériel sous la cloche, tout en pouvant lire la valeur sur le sonomètre.
- Pour la culture : les micros capacitifs et les micros à électrets sont censés pouvoir être plus sensibles à de faible variation de pressions que les micros dynamiques « classiques ».
- Il serait aussi possible connaissant la pression dans la cloche de faire le calcul d'ordre de grandeur pour comparer la longueur d'onde sonore au libre parcours moyen des molécules de gaz. Mais cette démonstration nous semble moins « immédiate », puisqu'elle repose sur un argument théorique (le fait que le son cesse de se propager si la longueur d'onde devient plus petite que le libre parcours moyen) plus que sur une mesure directe.

Conclusion :

Nous avons étudié dans ce montage (qui, contrairement aux apparences n'est pas sponsorisé par une grande marque d'aspirine) la propagation des ondes acoustiques dans différents matériaux. Nous avons réalisé une expérience d'interférence acoustique et nous avons illustré sur un exemple qualitatif le rôle de l'impédance acoustique. On pourrait prolonger l'étude en s'intéressant de façon plus quantitative aux réflexions/transmissions d'une onde sonore à l'interface entre deux milieux différents.