

Montage de physique 33 : Ondes acoustiques. (version écolo)

Yoann Genolini et Arnaud Ghibaudo

Année 2012-2013

Rapports du jury

- 2012** : « Le jury attend des notions plus variées que les seules mesures de célérité. On peut penser aux phénomènes de réflexion-transmission, d'interférences et de diffraction, de modes ; aux notions d'impédance acoustique, de timbre, de hauteur, d'effet Doppler ; aux nombreuses applications : instruments de musique, sonar, échographie. »
- 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** (« **Ondes acoustiques sonores et ultrasonores** ») : « Le rôle de la caisse de résonance d'un diapason reste méconnu. Les fonctionnements des microphones et haut-parleurs électrodynamiques présentes 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 oeuvre 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 noeud 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. »
- 1998** : « Le lien entre les expériences présentées et le titre du montage doit toujours être explicite. Il ne suffit pas de mettre au point des expériences où la température joue un rôle (par exemple la thermoélasticité des gaz avec l'étude des lois $PV = f(T)$) dans le montage sur le repérage et la mesure des températures ; il faut montrer comment le phénomène étudié peut conduire à la réalisation d'un thermomètre ou à la définition d'une échelle de température. De même, pour des phénomènes non-linéaires, il ne suffit pas de montrer quelques expériences sur le pendule simple ou sur le redressement du courant par des diodes ; il faut dégager en quoi les propriétés observées entrent dans le cadre plus général des phénomènes non-linéaires. »
- 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. »

Bibliographie

- *Handbook*
- Quaranta, *Tome I - Mécanique*

Table des matières

1	Caractère ondulatoire du son	2
1.1	Interférences	2
1.2	Musique	2
2	Vitesse de propagation d'une onde sonore	3
2.1	Célérité du son dans l'eau	3
2.2	Célérité du son dans un solide (Dural)	3
2.3	Influence de la température	4

3 Impédance acoustique	5
3.1 Cloche à vide	5
3.2 Calcul de l'impédance d'un matériau	5

Introduction

Dans ce montage nous allons parler d'ondes acoustiques. Ces ondes sont des perturbations du milieu dans lequel elles se propagent et on a l'habitude de parler de la propagation de la surpression, ou de la perturbation de la vitesse du fluide. Pour introduire ce caractère propagatif, on peut, avec deux micros et un claquement de mains, montrer le retard de la perturbation d'un micro par rapport à l'autre à l'oscilloscope. Mais ce critère ne nous assure pas que nous avons affaire ici à une onde. Nous allons nous en convaincre dans une première partie.

1 Caractère ondulatoire du son

1.1 Interférences

En musique, les musiciens peuvent utiliser un diapason donnant le *la* (à 440 Hz) pour accorder leur instrument. Il s'agit d'un dispositif qui permet de produire un son pur, c'est-à-dire qui n'émet qu'une seule fréquence, que l'on appelle *fundamental*. Pour mettre en évidence le caractère ondulatoire d'une onde sonore, on utilise deux diapasons de fréquences proches (nous avons utilisé le *mi* et le *fa*, ce qui fait un *demi-ton* de différence; on peut aussi utiliser deux mêmes notes (deux *la*)). On détecte l'onde sonore avec un microphone associé à un montage amplificateur. Sur l'un des diapasons, on ajoute une masselote qui modifie la fréquence du diapason. On règle la masselote afin d'obtenir des battements bien visibles à l'oscilloscope (et qui s'entendent très bien à l'oreille).

On peut noter s_1 et s_2 les amplitudes du son généré par les deux diapasons à une position donnée :

$$s_1(r_1, t) = s_{1,0}(r_1) \cos(2\pi\nu_1 t) \quad (1)$$

$$s_2(r_2, t) = s_{2,0}(r_2) \cos(2\pi\nu_2 t) \quad (2)$$

où r_1 et r_2 sont les distances respectives des deux diapasons par rapport au microphone.

Nous observons alors à l'oscilloscope la somme de ces deux contributions :

$$s(r_1, r_2, t) = s_{1,0}(r_1) \cos(2\pi\nu_1 t) + s_{2,0}(r_2) \cos(2\pi\nu_2 t) \quad (3)$$

On suppose alors $s_{1,0}(r_1) = s_{2,0}(r_2) = s_0$. On obtient :

$$s(t) = s_0 \cos\left(2\pi\frac{\nu_1 + \nu_2}{2}t\right) \cos\left(2\pi\frac{\nu_1 - \nu_2}{2}t\right) \quad (4)$$

Ce phénomène est caractéristique d'une onde et nous permet de déduire les fréquences des deux diapasons (expérience analogue au doublet du sodium), en mesurant à l'aide des curseurs $\frac{\nu_1 - \nu_2}{2}$ et $\frac{\nu_1 + \nu_2}{2}$.

1.2 Musique

Nous venons de montrer que le son est bel et bien une onde mécanique. Nous avons fait cela à l'aide de deux diapasons, qui génèrent une onde *harmonique*, c'est-à-dire une onde à une seule fréquence. L'appellation est un peu ironique car clairement, un son pur n'est pas particulièrement un beau son et ce que l'on appelle *harmonie* dans le langage courant correspond à une association agréable de sons. De la même façon, dans le quotidien de la musique, il arrive que l'on dise du son d'un instrument qu'il est *pur*, ce qui, là aussi, n'est pas du tout exact car c'est justement l'impureté du son d'un instrument qui fait sa qualité et son identité.

Prenons un tuyau d'orgue (un *la*). Si l'on souffle à l'intérieur et que l'on enregistre le son généré à l'oscilloscope, on voit, en faisant la transformée de Fourier, que le son du tuyau est constitué de plusieurs fréquences. Ces fréquences sont appelées *harmoniques*. Elles ont une *intensité* plus faible que celle du fondamental mais ne sont pas négligeables, et leur répartition sur la gamme de fréquences, ainsi que leurs intensités relatives, sont la signature du son de l'orgue. C'est ce que l'on appelle le *timbre*. De plus, si l'on regarde précisément, on remarque que les harmoniques présents sont des multiples entiers de la fréquence du fondamental. C'est le cas de beaucoup d'instruments, on parle alors de *partiels*. Mais ce n'est pas une généralité absolue. Le piano, par

exemple, présente une forte *inharmonicité* : si l'on enregistre le spectre d'une note de piano, on verra que les harmoniques se décalent de plus en plus lorsque l'on monte dans les aigus. Enfin, on définit aussi la *hauteur* d'un son par la fréquence de son fondamental : un son grave est dit *bas* tandis qu'un son aigu est dit *haut*.

Si maintenant on prend le même *la* mais avec une flûte en bois, on remarque que le spectre est totalement différent de celui de l'orgue. Cela montre que le timbre d'une flûte est différente de celui d'un orgue. Cela veut simplement dire que le son d'une flûte n'est pas du tout le même que celui d'un orgue.

Nous avons montré ici que le son est une onde mécanique et que généralement, son spectre est complexe, composé de nombreux harmoniques qui définissent l'identité même du son produit. Nous allons maintenant nous intéresser à ces caractéristiques de propagation dans les milieux.

2 Vitesse de propagation d'une onde sonore

2.1 Célérité du son dans l'eau

On dispose d'une cuve remplie d'eau distillée. Un émetteur et un récepteur d'ultrason sont disposés de part et d'autre de la cuve. Un boîtier nous permet d'envoyer une impulsion ultrasonore et de visualiser sur un même signal de sortie l'impulsion émise par l'émetteur et celle reçue par le récepteur. La distance entre les deux capteurs et le temps mesuré à l'oscilloscope nous permettent de remonter à la vitesse du son dans le milieu.

On commence par effectuer une mesure de la célérité du son dans l'eau. On fait plusieurs mesures avec différents écartements entre les capteurs et on trace L en fonction de t où L est la distance entre les capteurs et t le temps de propagation d'un capteur à l'autre (figure 1).

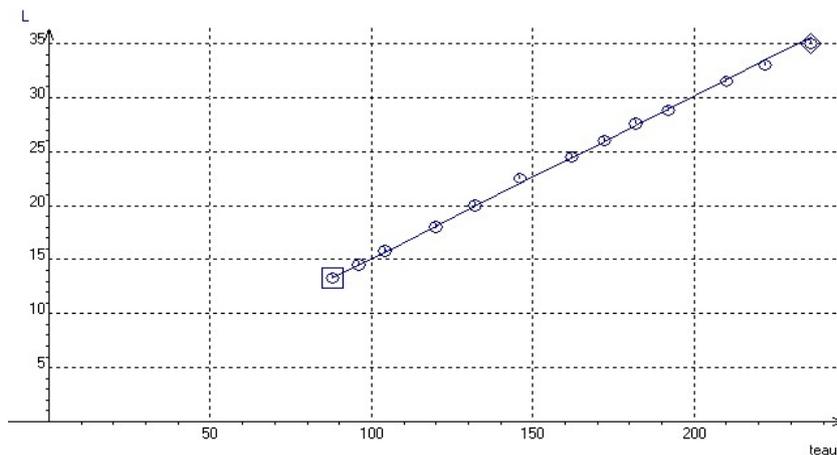


FIGURE 1 – Célérité du son dans l'eau.

La pente de la courbe donne la célérité du son dans l'eau c_{eau} :

$$c_{\text{eau}} = 1503 \text{ m s}^{-1} \quad (5)$$

C'est l'incertitude sur la mesure de la distance entre l'émetteur et le récepteur qui domine ici. Ce résultat est proche de la valeur tabulée à 1480 m s^{-1} .

2.2 Célérité du son dans un solide (Dural)

Si l'on introduit désormais le bloc de Dural d'une largeur $l = 85 \text{ mm}$, l'expression du temps mis par le son pour parcourir la distance L entre les deux transducteurs est :

$$t = \frac{L - l}{c_{\text{eau}}} + \frac{l}{c_{\text{Dural}}} \quad (6)$$

On trace ici t en fonction de L (figure 2).

La pente de la courbe donne $\frac{1}{c_{\text{eau}}}$ tandis que l'ordonnée à l'origine nous permet de remonter à c_{Dural} .

La valeur tabulée pour le Dural est de 6280 m s^{-1} .

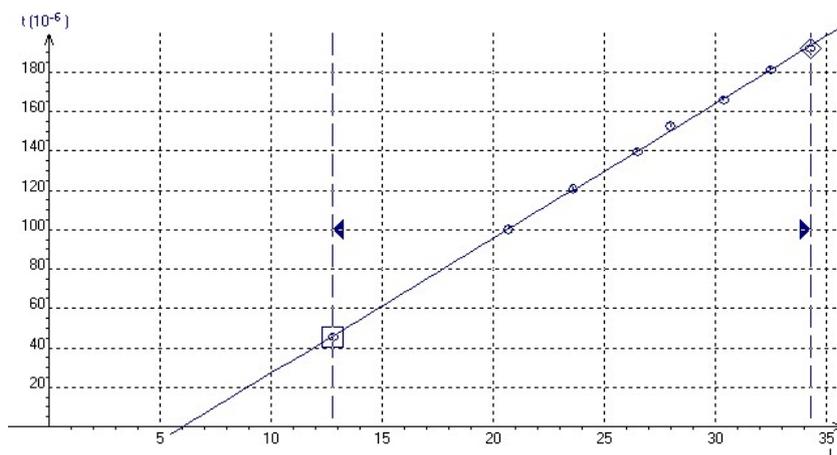


FIGURE 2 – Célérité des ondes de compression dans le dural.

2.3 Influence de la température

Pour étudier l'influence de la température sur la vitesse du son dans l'air, on utilise un *tube de Kundt* qui est un tube en verre en équilibre avec un thermostat (de l'eau). Un son harmonique est émis à l'une des extrémités du tube par un haut-parleur, l'autre extrémité étant bouchée. Un système d'ondes stationnaires s'établit dans le tube.

Le tube est monté en température (80°C). Un thermocouple fixé au microphone couissant permet de mesurer la température de l'air dans le tube. On se place à une résonance du tube de sorte à avoir un *ventre* de pression à l'extrémité bouchée du tube (l'amplitude des ventres est alors maximale). On place ensuite le microphone à un noeud de pression. On laisse alors refroidir le tube. Le système d'ondes stationnaires est modifié puisque la vitesse du son augmente. On retrouve le système d'ondes stationnaires en modifiant la fréquence du son pour retrouver le noeud de pression au niveau du micro. Ainsi on travaille à longueur d'onde constante :

$$\lambda = cste = \frac{c(T)}{\nu(T)} \quad (7)$$

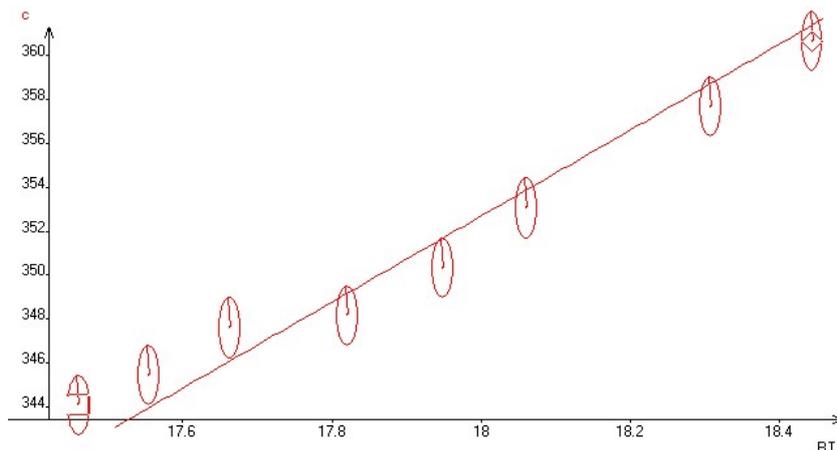
où $c(T)$ est la célérité de l'onde et $\nu(T)$ sa fréquence.

Si l'on assimile l'air à un gaz parfait, on connaît une expression théorique de la vitesse en fonction de la température :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho\chi_s}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (8)$$

où ρ est la masse volumique de l'air, χ_s le coefficient de compressibilité adiabatique, $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ le coefficient de Laplace, R la constante des gaz parfaits et M la masse molaire de l'air.

Si l'on trace $\nu(\sqrt{T})$, on retrouve un comportement linéaire attestant de la validité de cette loi (figure 3). Le coefficient directeur de cette droite est théoriquement $\frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{\gamma R}{M}}$. Avec le coefficient directeur mesuré, et en considérant que l'air est un gaz parfait diatomique, c'est-à-dire que $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,4$, on trouve une masse molaire $M = 28 \pm 2 \text{ g mol}^{-1}$. Cette valeur est à comparer à la valeur tabulée $M_{\text{tab}} = 29 \text{ g mol}^{-1}$. On retrouve bien ici une propriété de l'air.

FIGURE 3 – Expérience du tube de Kundt : la célérité c du son dans l'air en fonction de \sqrt{T} . Modélisation linéaire.

3 Impédance acoustique

3.1 Cloche à vide

On introduit un buzzer et un sonomètre dans une cloche à vide. Le sonomètre indique alors environ 90 dB. En faisant le vide, on remarque que l'on entend presque plus le buzzer (très bruyant à la base) alors que le sonomètre indique toujours qu'un son avec une intensité raisonnable persiste à l'intérieur de la cloche (environ 60 dB). Cela montre que le vide créé par la pompe n'est pas suffisant pour empêcher la propagation du son. En fait, si l'on n'entend presque plus le buzzer, c'est parce qu'en faisant le vide nous avons modifié l'impédance de l'air à l'intérieur de la cloche, ainsi la différence d'impédance entre l'air et le verre de la cloche fait que quasiment toute l'onde est réfléchiée.

Pour se convaincre qu'il s'agit bien d'un problème d'impédance, on peut comparer le libre parcours moyen d'une particule dans l'air à la longueur d'onde de l'onde. On a :

$$n\sigma l = 1 \quad (9)$$

où n est la densité particulaire, σ la section efficace et l le libre parcours moyen.

En assimilant l'air à un gaz parfait, on obtient :

$$l = \frac{k_B T}{l\sigma} = \frac{4 \cdot 10^{-21}}{10^2 \cdot 10^{-19}} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m} \quad (10)$$

Le buzzer émet un son pas trop aigu, on peut estimer que la fréquence est d'environ 500 Hz, la longueur d'onde vaut alors :

$$\lambda = \frac{c_{\text{air}}}{\nu} = \frac{340}{500} = 0,7 \text{ m} \quad (11)$$

On a alors $\lambda \gg l$: le son se propage bien dans l'air à l'intérieur de la cloche.

3.2 Calcul de l'impédance d'un matériau

Comme nous venons de le voir avec la cloche à vide, le transfert de l'énergie acoustique d'un milieu à l'autre est caractérisé par la variation d'impédance acoustique entre les deux milieux. Pour donner un peu plus de sens à cette notion, nous allons essayer d'en donner un ordre de grandeur pour un milieu. On choisit d'utiliser des ultrasons (plus agréable pour les oreilles et plus précis pour mesurer la vitesse du son dans la mousse) et de mesurer l'impédance acoustique d'une mousse plastique. On place alors l'émetteur et le récepteur d'ultrasons l'un face à l'autre. Il est nécessaire de bien les isoler avec de la mousse pour limiter l'effet du système d'ondes stationnaires qui se crée entre les deux socles. On mesure l'amplitude du signal au niveau du récepteur (on suppose implicitement ici sa linéarité par rapport à la pression). On interpose ensuite la mousse (épaisseur

$d = 21$ mm) bien orthogonale à la direction de propagation de l'onde sonore, et on mesure de nouveau l'amplitude du signal au récepteur et le déphasage. Le déphasage nous permet de remonter à la célérité des ultrasons dans la mousse :

$$\Delta\phi = 2\pi\nu d \left(\frac{1}{c_{\text{mousse}}} - \frac{1}{c_{\text{air}}} \right) \quad (12)$$

Pour $\Delta\phi = 74$, $\nu = 40.41$ kHz et $c_{\text{air}} = 343.4$ m s⁻¹, on a $c_{\text{mousse}} = 294 \pm 30$ m s⁻¹. On peut ensuite calculer la masse volumique de la mousse, puisque l'on connaît ses dimensions et son poids! On trouve $\rho = 26.7 \pm 0.2$ kg m⁻³. L'impédance acoustique est donc :

$$\rho c_{\text{mousse}} = 7.8 \pm 0.8 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (13)$$

Vérifions cette impédance à l'aide de l'amplitude transmise! On suppose que le récepteur est suffisamment loin de la source et qu'il est suffisamment petit pour pouvoir supposer l'onde plane. L'amplitude de l'onde transmise par la mousse sur l'amplitude de l'onde initialement détectée doit donc être :

$$\frac{A_{\text{avec mousse}}}{A_{\text{sans mousse}}} = t_{12}t_{21} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}, \quad (14)$$

où 1 est la mousse et 2 l'air.

Comme on connaît l'impédance de l'air à 20°C qui est de 413.5 kg m⁻² s⁻¹, et le rapport des amplitudes, on peut remonter à l'impédance de la mousse. On trouve une impédance voisine de 2000, ce qui bien l'ordre de grandeur attendu. Cependant on reste loin de la valeur calculée, ce qui peut s'expliquer par le fait que l'on a pas tenu compte de l'atténuation du son dans la mousse qui ne doit pas être si négligeable.

Conclusion

Dans ce montage nous avons vu différentes propriétés des ondes sonores : aspect ondulatoire, propagatif, énergétique. En matière d'applications, on peut citer des techniques médicales comme l'échographie ou encore dans l'industrie des tests de rigidité ou de résistance.