

MP30 – ACOUSTIQUE

21 janvier 2016

Paul Haddad & David Germain

«*Sinon c'est les relances : doublette ; jeu carré ; jeu de
piste ; jeu gagnant ; jeu moulin ; jeu-jeu ; joue-jeu ;
joue-joue ; joue-jié ; joue-ganou ; gagnar ; catakt ; tacat ;
cacatac ; cagat-cata et ratacat-mic. Ou : chante Sloubi.*

Nous, on va faire que chante Sloubi.»

PERCEVAL

Commentaires du jury

2014, 2015 : Signalons que les mesures d'atténuation des ondes acoustiques dans l'air qui ont été proposées par les candidats, n'ont pas donné de résultats probants.

2013 : Les phénomènes de réflexion/transmission et d'impédance 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. Le montage ne doit pas se limiter à des mesures de la célérité du son.

2012 : Le jury attend des notions plus variées que les seules mesures de célérité. On peut penser : (i) aux phénomènes de réflexion-transmission, d'interférences et de diffraction, de modes... (ii) aux notions d'impédance acoustique, de timbre, de hauteur, d'effet Doppler...(iii) aux nombreuses applications : instruments de musique, sonar, échographie.

Bibliographie

✚ *Expériences de Physique CAPES*, Duffait

→ Explication rapide des expériences et des résultats attendus.

✚ *Ondes mécaniques et diffusion*, Garing

→ Explique, sous forme d'exos, une bonne partie de ce qu'il faut savoir sur les ondes acoustiques.

✚ *Tome 1 : La mécanique*, Quaranta

→ Compléments, faut savoir que ça existe et que ça peut être utilisé dans cette leçon.

✚ *Handbook*

→ Pour les valeurs de référence.

Expériences

☞ Dépendance de la vitesse du son dans l'air avec la température (Tube de Kundt)

☞ Mesure de la vitesse du son dans l'eau (Ultrasons et temps de vol)

☞ Interférences (Trombone de König)

☞ Interférences (Battements avec diapason)

☞ Adaptation d'impédance (Glycérol)

Table des matières

1	Vitesse de propagation des ondes acoustiques	2
1.1	Propagation dans l'air et dépendance en température	2
1.2	Propagation dans l'eau des ondes ultra-sonores	3
2	Phénomène d'interférence	4
2.1	Battements avec des diapasons	4
2.2	Trombone de König	5
3	Adaptation d'impédance	6
4	Conclusion	7

Introduction

La première chose qui vient à l'esprit lorsqu'on parle de phénomène acoustique est la notion de son. Celle-ci nous semble intuitive mais il convient tout de même de la définir. On parlera de son comme étant le résultat d'une vibration issue d'un corps matériel se propageant par des ondes élastiques dans un milieu matériel jusqu'à un récepteur (*définition du Quaranta*), c'est donc une onde mécanique. Nous sommes familiarisés avec la notion de son, nous sommes capables d'en produire, de le faire dans une certaine direction pour transmettre une information puis de recevoir une réponse. Nous utilisons également les phénomènes sonores dans des domaines variés, dans les sonars par exemple, ce qui implique la nécessité de connaître certaines propriétés du son, notamment sa vitesse. La musique est un autre domaine où comprendre physiquement le fonctionnement des ondes sonores est primordial, ne serait-ce que pour produire des sons de hauteur/timbre/amplitude différentes.

L'étude d'un phénomène sonore doit normalement se faire en considérant l'ensemble (source + milieu de propagation + récepteur). Dans ce montage, nous allons nous concentrer sur certaines propriétés des phénomènes sonores, notamment la propagation, la mise en évidence du caractère ondulatoire et ses conséquences, et nous terminerons par quelques mots sur la transmission de ce type d'onde à travers différents milieux. Il convient également d'annoncer que nous allons nous intéresser aux fréquences du son situées dans les domaines de l'audible (20 – 20000 Hz) et de l'ultra-sonore (> 20000 Hz).

1 Vitesse de propagation des ondes acoustiques

1.1 Propagation dans l'air et dépendance en température

✦ Ch.28 Duffait & Ch.2.1 Garing

La vitesse des ondes sonores est une variable qui dépend des conditions dans lesquelles elle se propage. Commençons par la propagation qui nous est la plus courante, c'est à dire dans l'air. Faisons l'approximation que l'air est un gaz parfait diatomique, la célérité des ondes acoustiques dans ce type de gaz est donnée par la relation suivante :

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

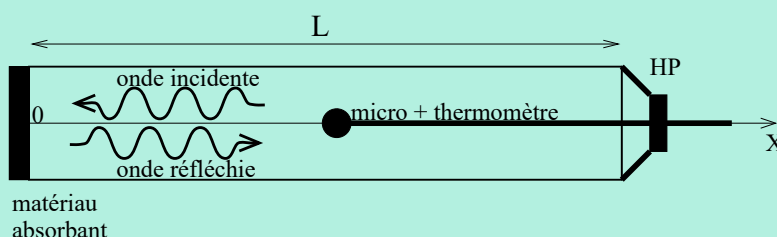
Où ici, $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1.4$, et $M = 29 \text{ g mol}^{-1}$. On s'attend donc à observer une évolution de la vitesse c en $\sqrt{T}$.

☕ Mesure de la vitesse du son et dépendance température



⌚ 5 min

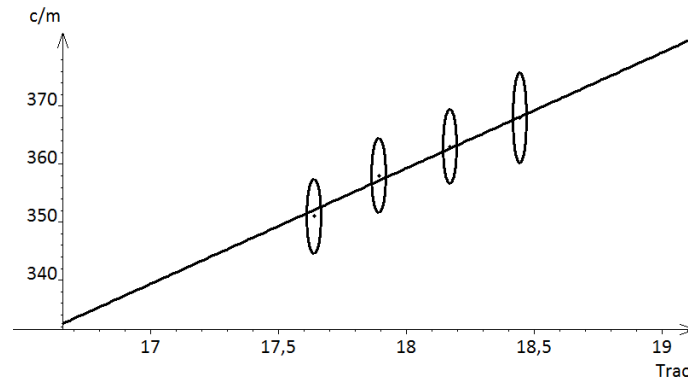
- Tube de Kundt avec pompe et bain thermostaté
- Sonde de pression et de température
- Oscilloscope
- GBF



Pour mesurer la vitesse c , on fait varier la fréquence pour se mettre aux alentours d'une résonance. On mesure alors la distance d entre 2 nœuds de pression voisins en faisant varier la position de la sonde. Pour diminuer les incertitudes, on réalise la mesure entre les 2 nœuds de pression les plus distants et on divise par le nombre d'intervalles entre 2 nœuds qu'on a passés. Sachant que, dans le tube, les ondes sont stationnaires, la distance entre 2 nœuds (mais aussi 2 ventres) est $\lambda/2$. On remonte alors facilement à la vitesse par $c = \lambda f$.

On réalise alors l'expérience pour différentes valeurs de T à $f = 1000 \text{ Hz}$.

On trace alors $c = g(\sqrt{T})$:



On observe alors que la modélisation en $\sqrt{T}$ est compatible avec nos mesures. On peut même comparer le coefficient a de la droite, sensément égal à $\sqrt{\frac{\gamma R}{M}}$:

$$\begin{aligned} a_{\text{exp}} &= (\quad \pm \quad) \text{ m s}^{-1} \text{ K}^{-1/2} \\ a_{\text{modèle}} &= 20.03 \text{ m s}^{-1} \text{ K}^{-1/2} \end{aligned}$$

Pour ce qui est des incertitudes, nous avons considéré celle sur la température, qui est de 1 K et celle sur la mesure de la longueur d entre 2 nœuds obtenue en regardant l'intervalle où on considère l'amplitude nulle.

Les 2 valeurs obtenues étant compatibles, on confirme que l'utilisation du modèle des gaz parfait était justifiée. On peut alors remonter aux paramètres physiques γ et M du gaz étudié, ici l'air.

1.2 Propagation dans l'eau des ondes ultra-sonores

🔗 Pas trop de biblio si ce n'est le Handbook

On étudie ici la propagation des ultra-sons dans un autre milieu : l'eau. L'eau étant plus dense que l'air, on s'attend à une vitesse de propagation plus élevée que dans l'expérience précédente.

L'expérience consiste en une mesure de temps de vol entre un émetteur et un récepteur d'ultra-son immergés :

☕ Mesure de la vitesse du son dans l'eau



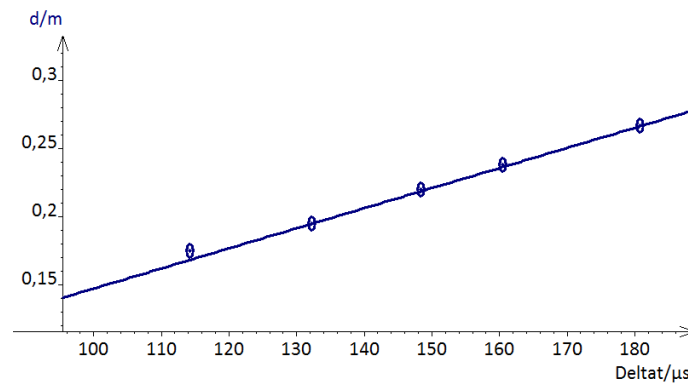
⌚ 5 min

- Émetteur et récepteur à ultra-sons.
- Cuve remplie d'eau
- Oscilloscope
- GBF

Paramètres de l'expérience :

- $f = 200 \text{ kHz}$
- $A = 10 \text{ Vpp}$
- Burst 10 ms de 3 cycles

Sur l'oscilloscope, on regarde simultanément l'allure du signal émis par l'émetteur (donc sortant directement du GBF) et l'allure du signal reçu par le récepteur. Le GBF envoie un burst, c'est à dire un signal sinusoïdal court, de quelques périodes, et séparé d'un temps assez long devant le temps de propagation de l'onde. Ainsi, sur l'oscilloscope, il suffit de mesurer le temps entre l'émission et la réception pour différentes valeurs de distance d entre émetteur et récepteur pour remonter ainsi à la vitesse du son par la relation $c = d/\Delta t$. Les incertitudes prises en compte sont celles sur la distance entre émetteur et récepteur (prise à 0.5 cm) et sur la mesure du temps (1 μs).



En faisant une régression linéaire, on mesure :

$$c_{\text{exp}} = (\quad \pm \quad) \text{ m s}^{-1}$$

$$c_{\text{tabulée}} = 1482 \text{ m s}^{-1} \text{ à } 20^\circ\text{C}$$

Les ondes ultra-sonores sont notamment utilisée par ce qu'on appelle les sonars, qui sont des appareils qui envoient ce type d'onde dans toutes les directions. En utilisant la propriété qu'une partie du son est réfléchié à un changement d'interface, et en faisant une mesure de temps de vol, il est possible de connaître la distance d'un sous-marin par exemple (à noter que les chauves souris utilisent ce même principe, mais dans l'air).

2 Phénomène d'interférence

2.1 Battements avec des diapasons

🔧 Ch.28 Duffait

Nous allons à présents nous intéresser à une propriété ondulatoire des ondes acoustiques, qui est leur propriété de créer, entre elles, des interférences. Une première expérience consiste à faire vibrer 2 diapasons de fréquences proches et d'observer sur un oscilloscope un phénomène de battement caractéristique des interférences.

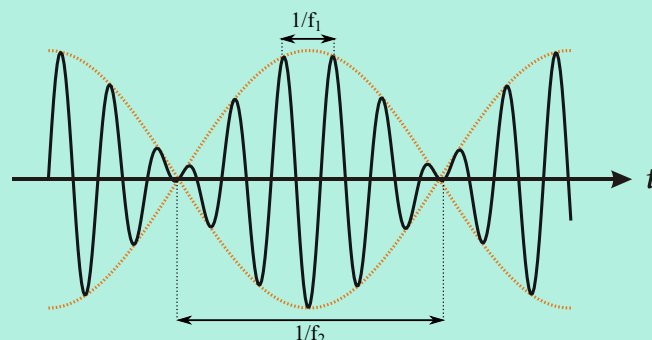
☕ Battements avec des diapasons



⌚ 5 min

- Deux diapasons de fréquence identique (Par exemple $f = 440 \text{ Hz}$).
- Masselotte fixable sur les diapasons
- Micro
- Oscilloscope

Pour légèrement diminuer la fréquence de l'un des 2 diapasons, il suffit de fixer la masselotte près de son extrémité. Une fois fait, on mesure indépendamment les fréquences des 2 diapasons f_1 et f_2 . On place le micro de telle sorte qu'il soit en sortie des 2 caisses de résonance des diapasons. Il suffit enfin de faire vibrer les 2 diapasons simultanément pour observer le phénomène de battement.



On peut mesurer la fréquence des 2 oscillations observées.

On mesure alors à l'oscilloscope les 2 fréquences suivantes :

$$\begin{aligned} f_{1\text{exp}} &= (\quad \pm \quad) \text{ Hz} \\ f_{2\text{exp}} &= (\quad \pm \quad) \text{ Hz} \end{aligned}$$

Le calcul, lui, nous donne :

$$\begin{aligned} f_{1\text{th}} &= \frac{f_{d1} + f_{d2}}{2} = (\quad \pm \quad) \text{ Hz} \\ f_{2\text{th}} &= \frac{f_{d1} - f_{d2}}{2} = (\quad \pm \quad) \text{ Hz} \end{aligned}$$

L'égalité des fréquences expérimentales et théoriques obtenues est compatible avec le fait que le phénomène observé est bien de nature interférencielle. On a considéré ici que la fréquence du diapason sans masse était de 440 Hz sans incertitudes. Les incertitudes considérées ici sont celles de la fréquence du diapason qui a une masse, mais aussi de la mesure des fréquences des battements.

Finalement, on comprend alors pourquoi, dans un orchestre, les instruments doivent être très précisément accordés, sinon on peut subir ce phénomène de battement désagréable à l'oreille.

2.2 Trombone de König

Je ne traite pas cette partie par manque de temps. Cependant je l'ai laissé dans le polycopié si jamais vous voulez remplacer une des expériences par celle-ci.

🔧 Ch.28 Duffait

Il est également possible de mettre en évidence le phénomène d'interférences avec un autre dispositif connu sous le nom de trombone de König. Ce dernier est similaire à l'interféromètre de Michelson classiquement connu en optique par le fait que les ondes sonores entrant dans le tube parcourent 2 bras de longueurs différentes avant de se "rencontrer". Contrairement à l'expérience précédente, il est ici possible de faire varier la longueur relative des bras pour obtenir ou non des interférences.

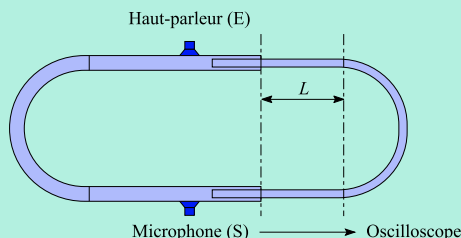
🔧 Trombone de König



⌚ 5 min

- Trombone de König
- Haut-parleur
- Micro
- GBF
- Oscilloscope
- 2 supports boy et une potence

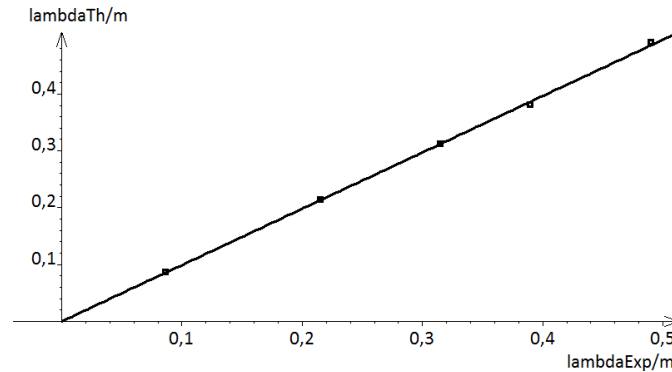
Le trombone possède 2 trous servant d'entrée et de sortie au son. Pour créer le son, on place simplement un haut-parleur au niveau d'un des trous et on récupère le signal de sortie à l'aide d'un petit micro fixé à une potence. Le trombone est placé sur les 2 supports boys pour ajuster la hauteur du dispositif par rapport au haut-parleur, ce dernier étant assez imposant.



On se fixe alors à une fréquence et on fait varier la longueur du bras pour observer, sur l'oscilloscope, une alternance de maxima et de minima de tension typique des interférences. Entre 2 minima (ou 2 maxima) successifs, le chemin acoustique a varié d'une distance λ et on a donc fait varier la coulisse d'une distance $\lambda/2$. Pour améliorer la précision, on fait varier la distance L de telle sorte à avoir observé plusieurs maxima, on divise ensuite par le nombre k d'intervalles parcourus. En comparant le λ mesuré à ce lui obtenu par la formule $c = \lambda f$, on peut vérifier que le phénomène observé est bien dû aux interférences.

Attention : Dans cette manip, 2 phénomènes entrent en jeux, les interférences qui nous intéressent mais aussi un phénomène de résonance dû à la création d'ondes stationnaires. On cherche alors à se mettre à des fréquences proches de la résonance pour avoir des amplitudes de battements plus élevées, ça améliore la précision des mesures.

En réalisant les mesures pour différentes valeurs de f , en prenant la vitesse du son à 25°C : $c = 343 \text{ m s}^{-1}$, on compare $\lambda_{\text{th}} = \frac{c}{f}$ et $\lambda_{\text{exp}} = \frac{2L}{k}$:



On obtient un coefficient directeur :

$$a_{\text{exp}} = (\quad \pm \quad)$$

Ce dernier est très proche de 1, comme attendu. Les incertitudes ici proviennent de l'erreur sur la mesure de l'allongement du chemin acoustique.

3 Adaptation d'impédance

✍ Ch.2.8 Garing

Afin de minimiser les pertes lors de la transmission d'un son lors d'un changement de milieu, il est nécessaire de faire ce qu'on appelle une adaptation d'impédance. Nous verrons que cette notion est notamment fondamentale dans la méthode de l'échographie. Tout comme en électricité où il est possible de relier les 2 variables couplées que sont la tension V et l'intensité I par une impédance Z , il est possible de relier les variables de pression p et de vitesse v qui caractérisent la propagation de l'onde acoustiques. On a donc :

$$Z = \frac{p}{v} = \rho c$$

Avec ρ la masse volumique.

Tout comme en optique, il est possible de définir, au passage d'une interface, un coefficient de réflexion R et de transmission T en intensité qui sont directement reliés aux impédances des milieux selon les relations suivantes :

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad T = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

On remarque que $R + T = 1$.

Le principe de l'adaptation d'impédance consiste à choisir des milieux d'impédance proche. En effet, plus Z_1 est proche de Z_2 , plus la valeur de R diminuera au profit de T , assurant ainsi une meilleure transmission entre les milieux.

☕ Adaptation d'impédance



⌚ 5 min

- Émetteur et récepteur à ultra-sons immergeables
- GBF
- Oscilloscope
- Glycérine

L'expérience consiste à coller émetteur et récepteur immergeables et de comparer le signal émis au signal reçu en terme d'amplitude. On remplace ensuite le milieu entre émetteur et récepteur (de l'air) par de la glycérine liquide pure, on réitère alors l'expérience. La tension imposée à l'émetteur est ici de 10 V à une fréquence $f = 40 \text{ kHz}$.



Expérimentalement, on regarde sur l'oscilloscope les tensions émises et reçues qu'on compare dans les 2 cas étudiés :

$$\begin{aligned} V_{\text{air}} &= (\quad \pm \quad) \text{ mV} \\ V_{\text{gly}} &= (\quad \pm \quad) \text{ mV} \end{aligned}$$

On voit bien ici que l'amplitude après transmission dans le glycérol est plus élevée que celle observée dans l'air. On peut alors mesurer le rapport :

$$\frac{T_{\text{gly}}}{T_{\text{air}}} = \frac{I_{\text{gly}}}{I_{\text{air}}} = \frac{V_{\text{gly}}^2}{V_{\text{air}}^2} =$$

Théoriquement on a la relation :

$$\frac{T_{\text{gly}}}{T_{\text{air}}} = \frac{Z_{\text{gly}}}{Z_{\text{air}}} \frac{(Z_{\text{HP}} + Z_{\text{air}})^2}{(Z_{\text{HP}} + Z_{\text{gly}})^2}$$

Or, les tables nous donnent $Z_{\text{air}} = 340 \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ et $Z_{\text{gly}} = 2.42 \times 10^6 \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Ainsi, en utilisant le résultat obtenu précédemment pour le rapport $\frac{T_{\text{gly}}}{T_{\text{air}}}$, on peut calculer la valeur de l'impédance des hauts parleurs. On trouve ainsi $Z_{\text{HP}} = 1.96 \times 10^5 \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (*J'ai mis ici une valeur calculée pendant la préparation, au cas où j'ai pas le temps de finir*). Comme attendu, on voit que cette valeur est plus proche de Z_{gly} que de Z_{air} , ce qui est compatible avec l'observation que l'amplitude obtenue après transmission dans le glycérol est plus élevée que dans l'air.

Le principe mis en évidence ici est appliqué en échographie, où on applique préalablement sur le corps un fluide d'impédance proche de l'émetteur/récepteur pour maximiser l'amplitude du signal reçu.

4 Conclusion

L'étude des ondes acoustiques tout au long de cette leçon nous a permis de mettre en évidence quelques unes de leurs propriétés. Il est intéressant de constater que la compréhension du phénomène ondulatoire qu'est le son trouve de nombreuses applications en dehors des laboratoires de physique. Les phénomènes de transmission et de réflexion permettent de choisir les bons matériaux pour isoler une maison ou encore pour détecter les sous-marins grâce aux sonars. Également, les instruments de musiques sont construits de telle sorte à ce que l'onde stationnaire qu'ils contiennent subisse un effet de résonance pour maximiser l'amplitude du son transmis. D'autres phénomènes existent mais non pas été présentés ici. On peut citer par exemple l'effet Doppler qui permet, notamment, de mesurer la vitesse d'un objet en mouvement.

Questions, commentaires.