

M30 : ACOUSTIQUE

Motivation de ce montage :

Le son interagit avec le milieu dans lequel il se propage. L'étude des caractéristiques de l'onde acoustique permet donc d'obtenir des informations de nature diverse sur le milieu traversé¹.
⇒ (expérience qualitative d'introduction)

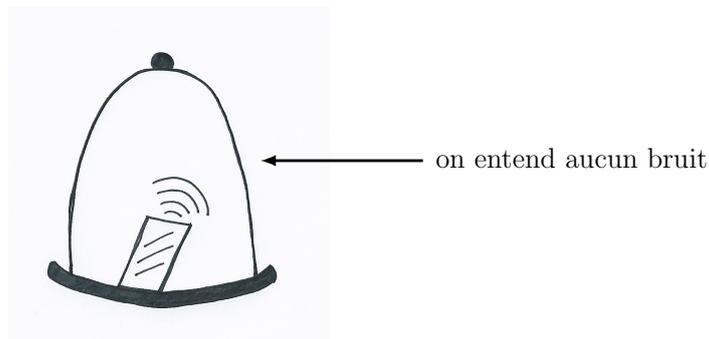
Plan :

- I) Obtenir des informations géométriques ⇒ (expérience 1)
- II) Sonder la matière ⇒ (expérience 2)
- III) Obtenir des informations dynamiques ⇒ (expérience 3)

Détail des expériences :

Expérience d'introduction : sonnette dans une cloche à vide

Au préalable, pendant la séance de préparation, on place une sonnette dans une cloche à l'intérieur de laquelle on fait un vide partiel à l'aide d'une pompe à vide.



Astuce : Placer la sonnette sur un morceau de mousse à l'intérieur de la cloche pour éviter la transmission de l'onde sonore par le socle de la cloche.

Pendant l'exposé : on défait le vide à l'intérieur de la cloche → on entend le bruit de la sonnette.

→ *interprétation de cette expérience :*

C'est une expérience historique² visant à montrer la nécessité d'un milieu pour que l'onde sonore se propage.

Cette interprétation est en réalité à nuancer et la véritable explication de cette expérience est la suivante. Lorsque l'on diminue la pression de l'air dans la cloche en faisant le vide, on diminue suffisamment l'écart d'impédance³ entre l'intérieur de la cloche et la paroi de verre pour que le

1. C'est un domaine d'étude de l'acoustique qui est apparu suite au naufrage du Titanic en 1912 et s'est ensuite développé pendant la première guerre mondiale avec notamment l'invention du sonar.

2. Robert Boyle en 1660.

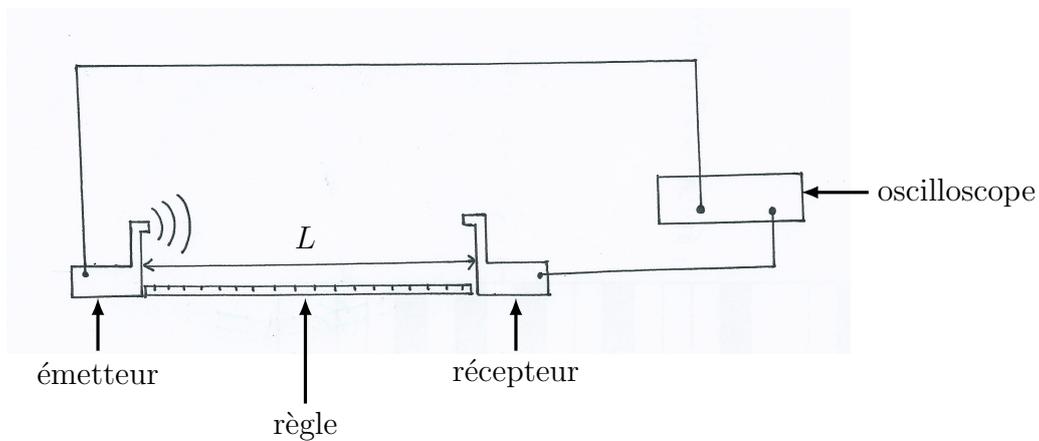
3. Voir la définition plus loin.

son soit presque intégralement réfléchi et donc quasiment pas transmis : on n'entend rien. Néanmoins, cette expérience montre que l'onde sonore interagit avec le milieu qu'elle traverse. On se pose alors la question suivante : peut-on utiliser cette propriété ?

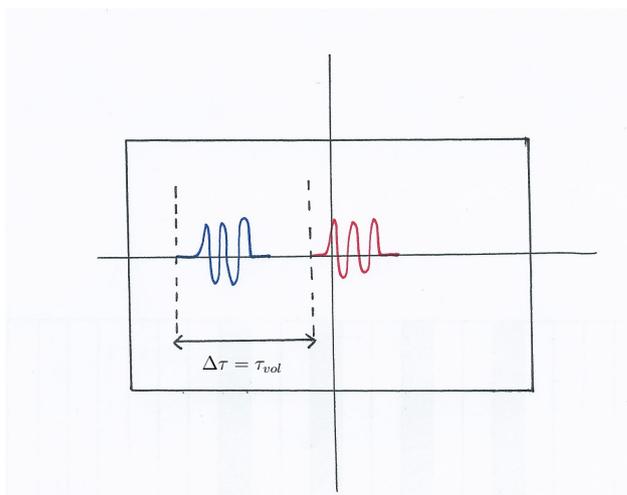
Expérience 1 : mesure de la vitesse du son dans l'air et application du sonar

1) mesure de la vitesse du son dans l'air

On utilise des trains d'ultra-sons à 44 kHz.



→ zoom sur l'écran de l'oscilloscope :



Astuces :

- Pour éviter les réflexions parasites sur la table et limiter le bruit du signal, on place de la mousse sur la table entre l'émetteur et le récepteur
- Utiliser l'oscilloscope en mode « average ».

On mesure également $L \equiv$ distance émetteur/récepteur. On en déduit :

$$c_{air}^{exp} = \frac{L}{\tau_{vol}} = \dots$$

On compare la valeur expérimentale obtenue à la valeur théorique attendue :

$$c_{air}^{th} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \gamma = 1,4 \\ M = 29 \text{ g/mol} \\ T = \text{température de la salle que l'on mesure} \\ \text{avec un thermomètre de platine} \end{cases}$$

Remarques :

- Pour déterminer c_{air}^{exp} on ne réalise qu'une seule mesure en écartant le plus possible le récepteur de l'émetteur⁴ car le mode « average » de l'oscilloscope effectue déjà une moyenne des signaux reçus sur plusieurs émissions-réceptions.
- Avec cette méthode utilisant des trains d'ultra-sons, la vitesse mesurée est la *vitesse de groupe*.

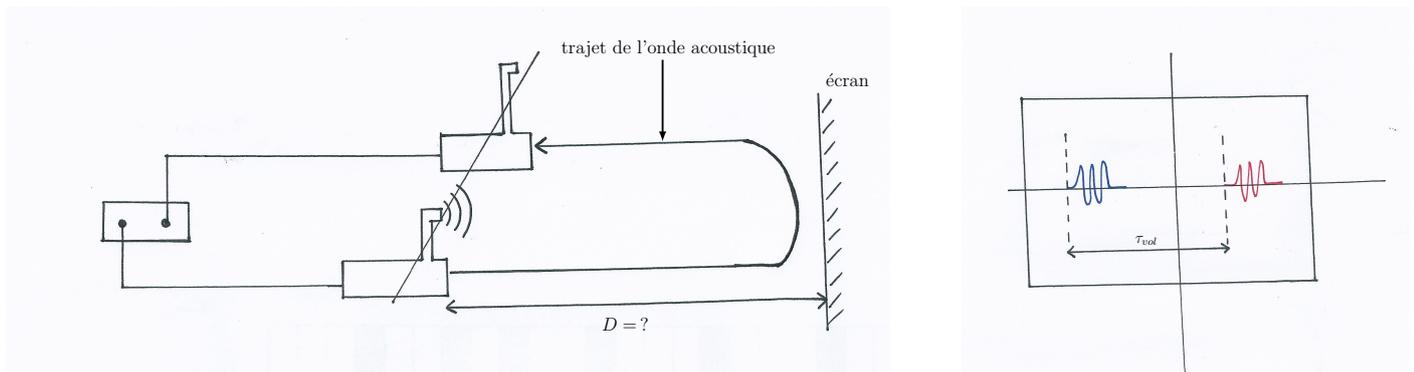
2) le sonar

Pour des raisons pratiques, on présente cette expérience dans l'air et non dans l'eau.

But : connaissant maintenant la vitesse de propagation du son dans l'air, est-on capable de remonter à des informations sur l'environnement qui nous entoure comme par exemple déterminer à quelle distance se situe un obstacle ?

→ dans le montage proposé ici : c'est un écran qui joue le rôle d'obstacle.

On aligne maintenant l'émetteur et le récepteur utilisés précédemment et toujours reliés aux voies 1 et 2 de l'oscilloscope respectivement.



On détermine : $D_{sonar} = c_{air} T_{vol} / 2$ ⁵.

On commente le résultat en le confrontant à une mesure de la même distance D effectuée à l'aide d'une règle.

4. On réduit ainsi les incertitudes relatives sur les mesures de distance et de temps.

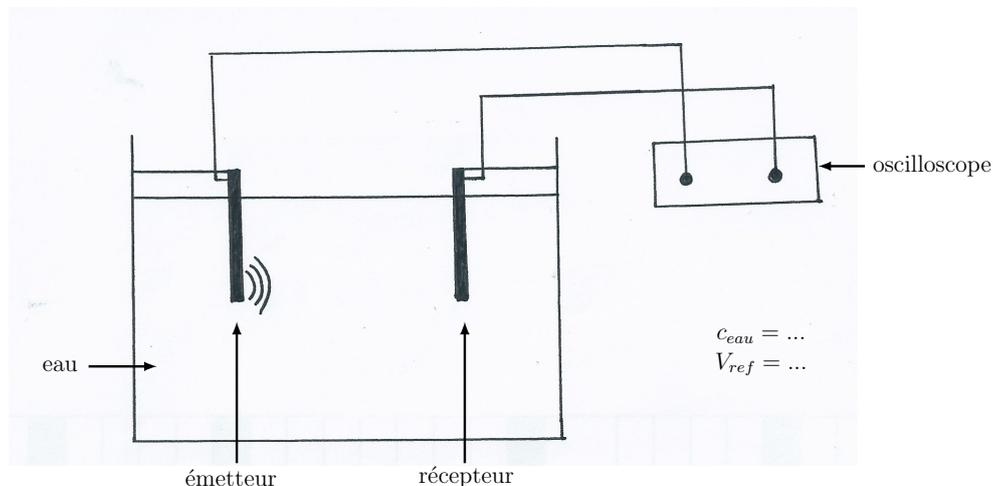
5. Le facteur 1/2 vient de la prise en compte de l'aller-retour de l'onde acoustique.

Expérience 2 : détermination de la masse volumique d'une plaque de duralumin (ρ_{dur})

Remarques préliminaires :

- Jusqu'à présent, on a seulement utilisé la base temporelle de l'oscilloscope. On va maintenant également exploiter la base des amplitudes.
- On utilise la cuve à ondes à notre disposition, fournie avec une plaque de duralumin.
- Le duralumin est un alliage de cuivre et d'aluminium. Il est notamment particulièrement utilisé dans l'industrie aéronautique du fait de sa grande résistance.
- Pour déterminer ρ_{dur} , on va utiliser les propriétés de transmission de l'onde acoustique aux interfaces eau/duralumin. On commence donc par caractériser la propagation du son dans l'eau en mesurant sa vitesse (c_{eau}) et en relevant l'amplitude du signal reçu à l'oscilloscope (V_{ref}) qui nous servira de référence par la suite.

1) détermination de c_{eau}



Pour la mesure de c_{eau} : même démarche expérimentale que celle employée pour la mesure du son dans l'air.

→ on détermine c_{eau} et on compare la valeur expérimentale obtenue à celle tabulée (*Handbook*).

Astuce : Pour gagner un peu de temps sur cette deuxième expérience qui peut s'avérer longue, on conseille de réaliser cette mesure de c_{eau} au préalable en préparation, d'autant que ça n'apporte rien de montrer à nouveau ce qui a été fait dans l'expérience précédente.

2) détermination de ρ_{dur}

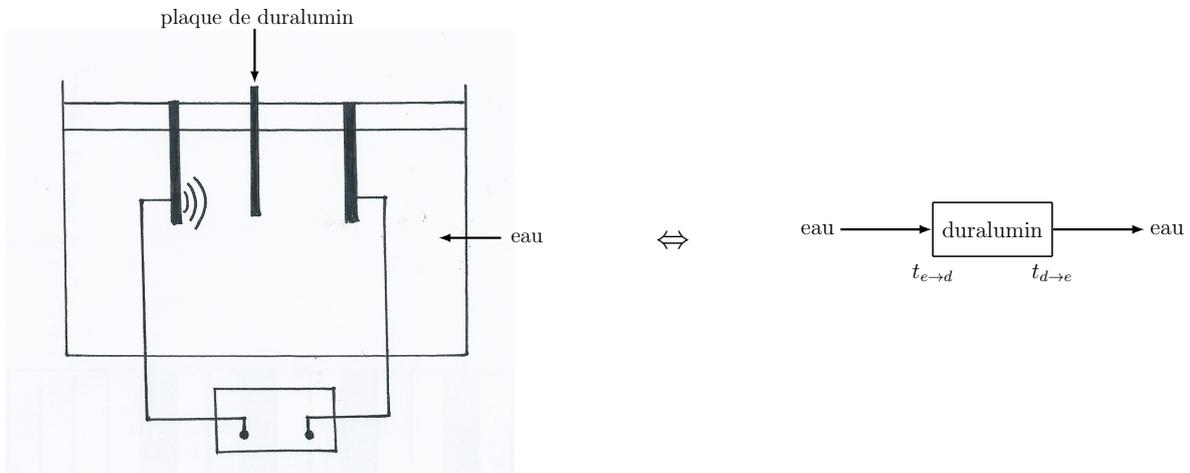
→ quelques éléments de théorie :

- notion d'impédance acoustique (caractéristique d'un milieu) : $Z = \rho_0 c$, où ρ_0 est la masse volumique du milieu traversé et c est la vitesse du son dans le milieu traversé.

- transmission d'une onde acoustique lors du passage d'un milieu 1 vers un milieu 2 : $t_{1 \rightarrow 2} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}$.

→ l'expérience :

★ 1ère étape : détermination de Z_{dur}



Le coefficient de transmission total s'écrit :

$$t = \frac{V_t}{V_{ref}} = t_{e \rightarrow d} \times t_{d \rightarrow e} = \frac{4Z_{eau}Z_{dur}}{(Z_{eau} + Z_{dur})^2}$$

avec V_t l'amplitude du signal lu à l'oscilloscope en présence de la plaque de duralumin.

L'impédance du duralumin est alors la solution de l'équation du 2^d degré suivante :

$$Z_{dur}^2 + 2Z_{eau} \left(1 - 2\frac{V_{ref}}{V_t} \right) Z_{dur} + Z_{eau}^2 = 0$$

On connaît $Z_{eau} = 1,49 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

On lit sur l'oscilloscope : $V_t = \dots$

→ On détermine : $Z_{dur} = \dots$

Remarque : Pour déterminer correctement V_t , il faut placer la plaque de duralumin de sorte que

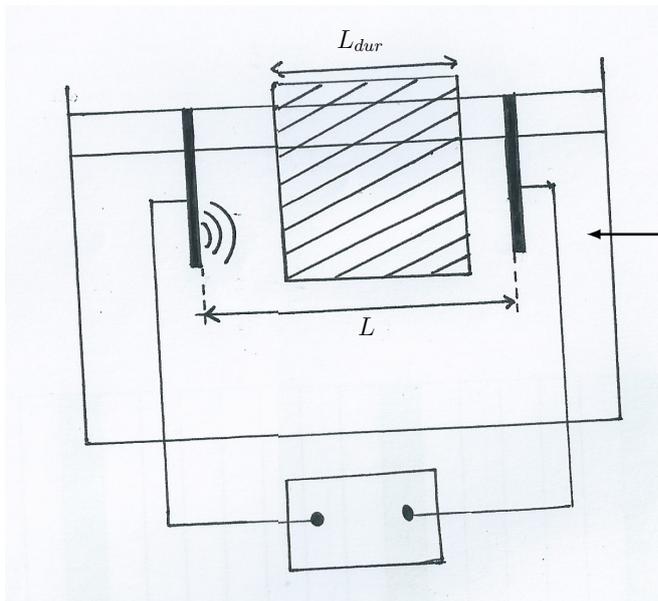
l'onde acoustique générée traverse une épaisseur de plaque minimum (*voir schéma ci-dessus*).

★ **2ème étape** : détermination de c_{dur} et obtention de ρ_{dur}

On sait que $Z_{dur} = \rho_{dur} \times c_{dur}$.

Il faut donc mesurer c_{dur} pour ensuite obtenir : $\rho_{dur} = \frac{Z_{dur}}{c_{dur}}$.

Pour ce faire, on place maintenant la plaque de duralumin de sorte que l'onde acoustique générée traverse une épaisseur de plaque maximum (*voir schéma ci-dessous*).



L_{dur} = longueur de la plaque de duralumin traversée par l'onde acoustique
 L = distance émetteur-récepteur

Astuces :

- Mesurer au préalable L_{dur} avant de plonger la plaque dans l'eau de la cuve
- Pour mesurer L , placer une règle au fond de la cuve et pour éviter les problèmes de parallaxe, attendre un peu avant de lire L sur la règle après avoir plongé la plaque de duralumin dans l'eau.

On lit sur l'écran de l'oscilloscope le décalage temporel τ_{vol} entre l'émission et la réception de l'onde acoustique :

$$\tau_{vol} = \frac{L - L_{dur}}{c_{eau}} + \frac{L_{dur}}{c_{dur}} .$$

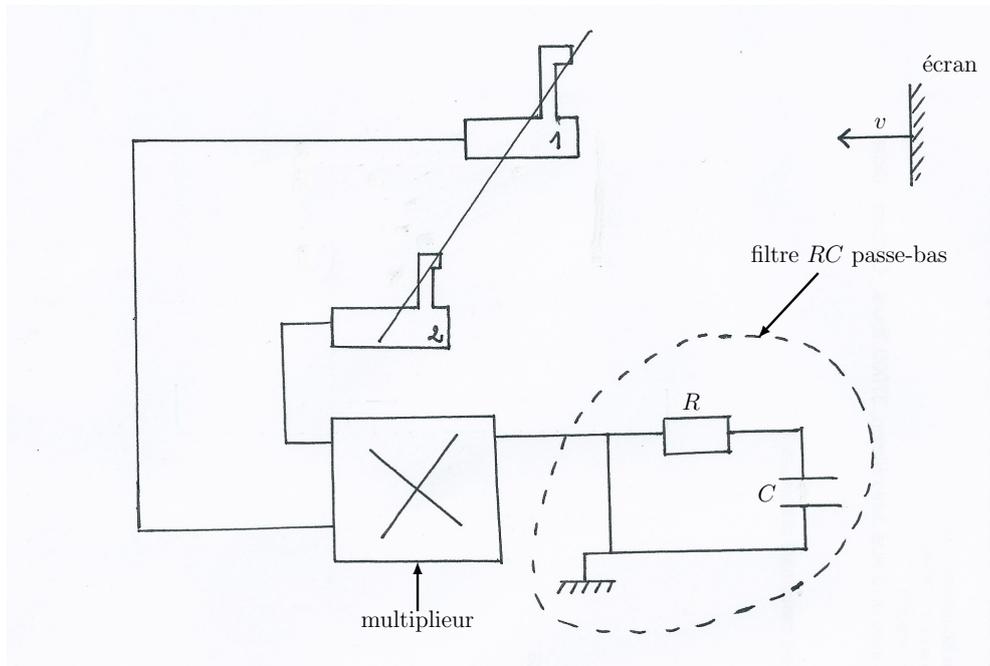
On en déduit : $c_{dur} = \dots$

On peut comparer cette valeur avec celle tabulée dans le *Handbook*.

→ on détermine : $\rho_{dur} = \dots (\approx 3000 \text{ kg/m}^3)$.

Expérience 3 : effet Doppler et détermination d'une vitesse

But : mesure d'une vitesse en utilisant l'effet Doppler⁶.



Ici, on laisse fixe l'émetteur et le récepteur mais on déplace l'écran ; ce qui revient à modéliser un effet Doppler en configuration émetteur mobile et récepteur fixe :

$$\nu_2 = \frac{1}{1 - v/c} \nu_1 \quad \text{avec } \nu_1 = 40 \text{ kHz}.$$

Dans ce montage, on multiplie les signaux (1) et (2), donc le signal total est de la forme : $A \cos(\omega_1 t) \times \cos(\omega_2 t + \varphi) \propto [\cos((\omega_1 - \omega_2)t - \varphi) + \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \varphi)]$. Comme seule la contribution en $\cos((\omega_1 - \omega_2)t - \varphi)$ nous intéresse, on utilise un filtre passe-bas (RC) pour couper la deuxième contribution en $\cos((\omega_1 + \omega_2)t + \varphi)$.

→ fabrication du filtre RC passe-bas : choix de ses caractéristiques

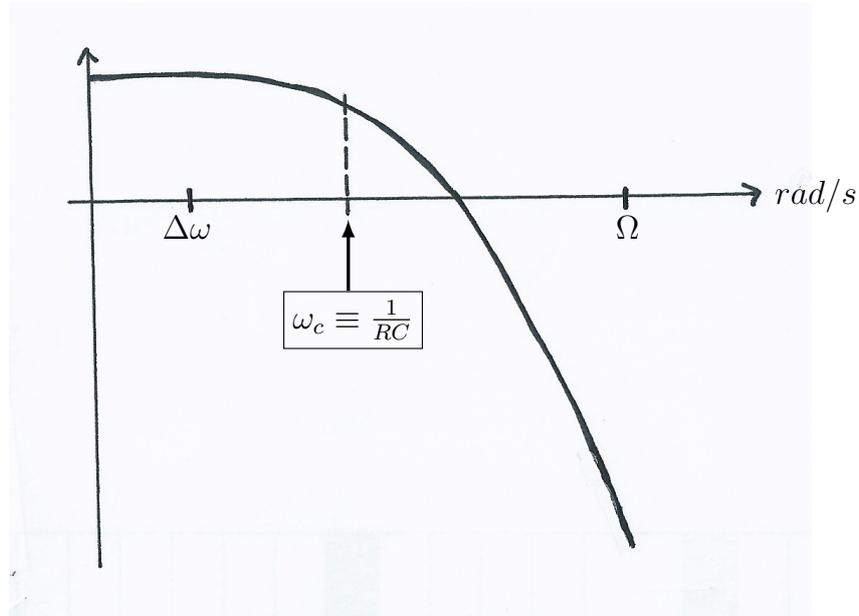
On suppose que la vitesse de déplacement de l'écran est de l'ordre de $v = 0,5 \text{ m/s}$ ⁷.

On obtient alors : $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1 = 5,8 \text{ Hz}$ et $\Delta\omega = 2\pi\Delta\nu = \omega_2 - \omega_1 = 364 \text{ rad/s}$.

On a aussi : $\nu_1 + \nu_2 \approx 2\nu_1 = 80 \text{ kHz} \rightarrow \Omega = 2\pi(\nu_1 + \nu_2) = 5 \times 10^5 \text{ rad/s}$.

6. Effet Doppler \equiv décalage en fréquence d'une onde, ici l'onde acoustique, entre l'émission et la réception lorsque la distance émetteur-récepteur varie au cours du temps.

7. C'est l'ordre de grandeur que nous avons obtenu en manipulant.



On décide d'imposer : $\boxed{\omega_c = 10\Delta\omega}$.

On a alors : $RC = 1/(10\Delta\omega) = 2,7 \times 10^{-4} s$.

→ on choisit par exemple : $\begin{cases} C = 3,3 \times 10^{-7} F \\ R = 1 k\Omega \end{cases}$.

En déplaçant l'écran⁸, on mesure $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$ à partir de plusieurs périodes capturées à l'écran de l'oscilloscope et on en déduit la vitesse de déplacement de l'écran.

Astuce : utiliser le mode « high-resolution » de l'oscilloscope pour avoir un signal le plus propre possible.

On commente ce résultat en le comparant à celui obtenu par un autre protocole expérimental qui consiste à mesurer à l'aide d'un chronomètre le temps que met l'écran pour parcourir une règle de 1m par exemple.

8. On essaie d'être le plus régulier possible.

Questions

- Quelle est la pression de référence pour dire que le gaz est parfait ? *pression du point critique.*
- A quoi correspond $\gamma = 1,4$? En quoi est-ce justifié dans le cas de l'air ? *gaz parfait diatomique ; c'est bien le cas dans l'air majoritairement constitué de N_2 et O_2 .*
- Quel est le temps de réponse des capteurs en général ? *de l'ordre de la ns.*

Commentaires

- bon plan, original
- en conclusion : revenir sur l'expérience qualitative d'introduction (cloche) en la traitant de manière plus quantitative : mettre par exemple un micro dans la cloche. Évoquer à ce moment l'interprétation en terme d'impédance.
- problème du traitement des incertitudes. Dans l'expérience 2, une propagation des incertitudes est impossible (trop d'étapes de calcul) : envisager plutôt dans ce cas un traitement statistique des incertitudes (reproduire plusieurs fois la mesure).
- expérience 3 : déplacer lentement l'écran ; mieux vaut utiliser une webcam pour déterminer la vitesse de déplacement de l'écran quand on n'utilise pas l'effet Doppler.
- Lorsqu'une mesure échoue, donner la valeur obtenue en préparation. Ne pas sauter l'expérience.

Propositions d'expérience

- lois de Snell-Descartes avec la plaque de duralumin
- montage acousto-optique
- tube de Kundt
- expérience de production de sons : phénomènes de battements (TF, on peut faire un traitement numérique)

Références

- « Acoustique Générale », C. Potel et M. Bruneau, *Technosup*, **Ellipse**, Paris (2006)
- Notice d'utilisation de la cuve à ondes
- « Changement de fréquence, effet Doppler », BUP n° 804 Vol.92 (Mai 1998)
- « La Physique pour les nuls »