

MP54 : Ondes acoustiques

Alexandre Koessler

Expériences

- ☞ mesure de la vitesse du son dans l'air et application à la télémétrie
- ☞ mesure de la vitesse du son dans l'eau et dans le Dural
- ☞ trombone de König
- ☞ mesure de l'effet Doppler par détection synchrone
- ☞ guide d'onde

Commentaires du jury

- **2017** : Ce montage se limite souvent à la mesure de la célérité du son dans l'air et à l'étude du diapason. L'utilisation de la représentation de Lissajous pour mettre en évidence les passages en phase n'est pas généralisée. L'utilisation d'émetteurs et récepteurs ultrasonores est répandue, mais leur principe de fonctionnement doit être connu. Par ailleurs, certains dispositifs commerciaux conduisent à des réflexions parasites qui perturbent les mesures.
- **2014-2016** : 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. Signalons enfin 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.
- **2012** : 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.

Références

- [1] Roger Duffait. *Expériences de physique : CAPES de sciences physiques concours de recrutement de l'enseignement secondaire, CAPES, CAPLP2, agrégation*. Bréal, Rosny, 2e édition. édition, 1996.
- [2] Michel Fruchart, Pierre Lidon, Étienne Thibierge, Maxime Champion, and Arnaud Le Diffon. *Physique expérimentale : optique, mécanique des fluides, ondes et thermodynamique expériences*. LMD Physique. De Boeck supérieur, Louvain-la-Neuve, 2016.

Plan

1	Propagation libre du son	2
1.1	Propagation du son dans l'air	2
1.2	Propagation du son dans l'eau et dans un solide	3
2	Aspects ondulatoires	6
2.1	Interférences acoustiques	6
2.2	Effet Doppler	6
2.3	Propagation guidée	7

But

Mettre en évidence les différentes propagations du sons dans des milieux matériels, ainsi que les phénomènes liés au caractère ondulatoire des ondes sonores.

Introduction

On considère un fluide homogène isotrope, initialement au repos, décrit par son champ de pression $P(\mathbf{r}, t)$ et son champ de vitesse $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$. On suppose que l'écoulement induit par l'onde est parfait, que la propagation est adiabatique, et que le coefficient de compressibilité isentropique χ_S et la masse volumique ρ_0 du fluide sont constants. En traitant l'onde acoustique comme une perturbation du premier ordre, on peut écrire que

$$P(\mathbf{r}, t) \approx P_0 + p_1(\mathbf{r}, t) \quad (1)$$

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}, t) \approx \mathbf{0} + \mathbf{v}_1(\mathbf{r}, t) \quad (2)$$

L'équation d'Euler, l'équation de continuité et l'équation d'état du fluide permettent alors d'aboutir aux équations de propagations de la surpression p_1 et du champ de vitesse $\mathbf{v}_1$

$$\square p_1 = \Delta p_1 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

$$\square \mathbf{v}_1 = \Delta \mathbf{v}_1 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{v}_1}{\partial t^2} = 0 \quad (4)$$

avec $c = \frac{1}{\sqrt{\rho_0 \chi_S}}$ la vitesse de phase de l'onde.

1 Propagation libre du son

1.1 Propagation du son dans l'air

Dans le cas de l'air que l'on suppose comme étant un gaz parfait aux températures ambiantes et la pression atmosphérique, on a la relation suivante pour la vitesse du son :

$$c = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}} \quad (5)$$

On a ici :

- $\gamma = \frac{7}{5} \approx 1.4$ le coefficient adiabatique pour un gaz diatomique
- $R = 8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ constante des gaz parfaits
- $M = 29 \text{ g mol}^{-1}$ masse molaire de l'air

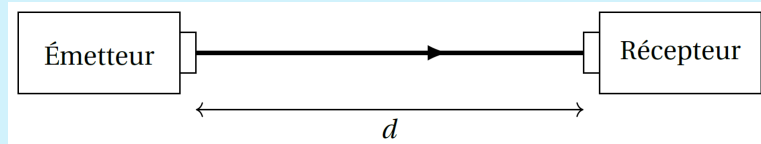
Ainsi, pour différentes températures ambiantes, on a :

Température T (°C)	Vitesse du son dans l'air c_{air} (m s ⁻¹)
17	341.3
20	343.0
25	345.9

☕ Expérience

Mesure de la vitesse du son dans l'air - [2]

On envoie un signal sinusoïdale dans l'émetteur à environ 40 kHz (amplitude 10 V) en la modifiant pour atteindre la fréquence de résonance de l'émetteur et du récepteur.

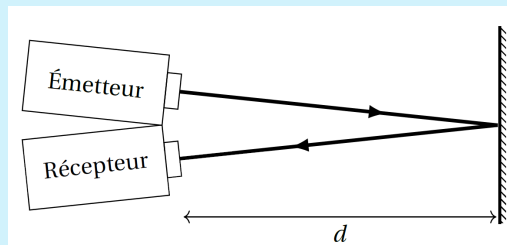


On déplace le récepteur de quelques longueurs d'onde (on peut les compter en mode XY) et on mesure la distance sur laquelle on a déplacé le récepteur. On obtient alors rapidement $c_{\text{air}} = f \lambda$. Une autre méthode est d'envoyer un *burst* de sinusoides de **Burst Period** 10 ms. On mesure alors à l'oscilloscope le temps de vol de l'onde entre les débuts des *burst*. Le récepteur ayant un certain temps de réponse, le début du *burst* reçu est difficile à voir, l'incertitude de lecture du temps de vol est alors d'au moins une période de l'onde. On a alors aussi facilement $c_{\text{air}} = \frac{d}{t_{\text{vol}}}$ avec d la distance entre l'émetteur et le récepteur qui elle aussi peut être difficile à mesurer précisément. On peut faire une régression linéaire pour obtenir une valeur plus précise.

☕ Expérience

Application à la télémétrie - [2]

Maintenant que l'on a une mesure expérimentale de la vitesse du son dans l'air, on peut s'en servir pour mesurer la distance à un obstacle. On place une plaque d'aluminium en face du récepteur et de l'émetteur placés côte à côte.



On mesure alors de la même façon le temps de vol d'un *burst* de sinusoides pour remonter à la distance parcourue par l'onde $2d = c_{\text{air}} t_{\text{vol}}$

Remarque

On peut montrer la dépendance en température de la vitesse du son dans l'air grâce à l'expérience du tube de Kundt.

1.2 Propagation du son dans l'eau et dans un solide

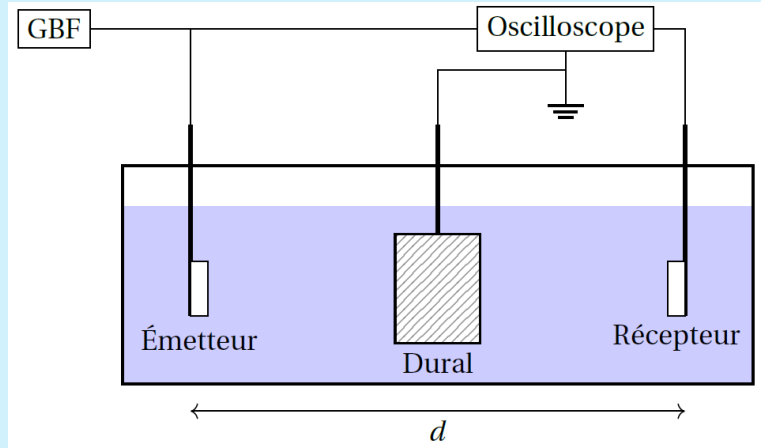
La vitesse du son dans l'eau vaut :

Température T (°C)	Vitesse du son dans l'eau c_{eau} (m s ⁻¹)
17	1.47×10^3
20	1.48×10^3

Expérience

Mesure de la vitesse du son dans l'eau - [2]

L'expérience ici est très similaire à l'expérience précédente. Il faut ici alimenter l'émetteur avec un signal sinusoïdale à environ 420 kHz (modifier légèrement cette fréquence pour trouver la fréquence de résonance) et d'amplitude 10 V.



Cette fois-ci, on fait la régression linéaire de d en fonction de t_{vol} de coefficient directeur c_{eau} . Ne pas hésiter à tourner légèrement le récepteur et l'émetteur après chaque déplacements pour obtenir le maximum d'amplitude reçue.

Pour le Dural utilisé, le constructeur nous donne $E = 73 \text{ GPa}$, $\rho = 2.8 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ et $\nu = 0.33$, on alors :

$$c_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \approx 6.2 \times 10^3 \text{ m s}^{-1} \quad (6)$$

$$c_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \approx 3.1 \times 10^3 \text{ m s}^{-1} \quad (7)$$

Il existe, en effet deux types d'ondes sonores qui peuvent se propager dans un solide :

- des ondes P de compression : elles sont longitudinales et se propagent à la vitesse c_P .
- des ondes S de cisaillement : elles sont transversales donc qui ne peuvent se propager que dans les solides et se propagent à la vitesse $c_S < c_P$.

Lorsque que l'on va rajouter le Dural de longueur D entre l'émetteur et le récepteur, on va alors vouloir vérifier les lois suivantes :

$$t_P = \frac{D}{c_P} + \frac{d-D}{c_{\text{eau}}} \quad (8)$$

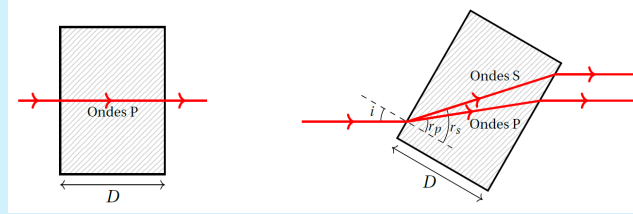
$$t_S = \frac{D}{c_S} + \frac{d-D}{c_{\text{eau}}} \quad (9)$$

On mesure les temps de vol t_P des ondes traversant le Dural de type P et de même pour les ondes S pour différentes distances émetteur-récepteur d . Comme $c_S < c_P$, on aura alors $t_S > t_P$.

Expérience

Mesure des vitesses du son dans le Dural - [2]

On se place dans les mêmes conditions que l'expérience précédente mais cette fois-ci, on place le bloc de Dural de façon à ce que les ondes ultrasonores traversent la plus grande épaisseur de Dural : $D \approx 8.5 \text{ cm}$. On voit alors apparaître de nouveaux *bursts* de sinusôides avant le *burst* provenant du signal propagé seulement dans l'eau.



De plus, en tournant légèrement le Dural, on peut faire apparaître ou disparaître les deux signaux assez rapprochés correspondant aux propagations des ondes P et S dans le Dural. Cela est dû au fait qu'il existe de la même manière que pour les ondes électromagnétiques des lois de Snell-Descartes, il existe donc des angles limites de réfraction pour chacune de ces ondes P et S qui sont dans ce cas très faibles.

$$\frac{\sin i}{c_{\text{eau}}} = \frac{\sin r_P}{c_P} = \frac{\sin r_S}{c_S} \quad (10)$$

Comme on se limite à des angles d'incidence très faible, on peut alors supposer que la distance traversé par les ondes dans le Dural reste égale à D .

On réalise alors la régression linéaire de $d - D$ en fonction de t_P de coefficient directeur c_{eau} et d'ordonnée à l'origine $\frac{D}{c_P}$, on fait de même pour les ondes S .

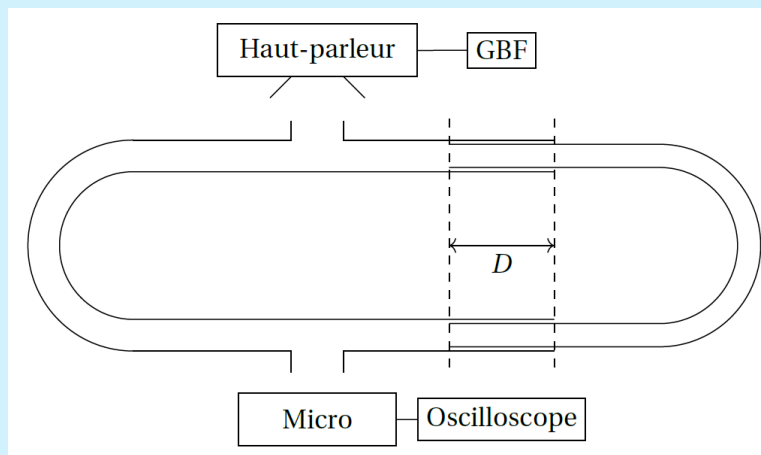
2 Aspects ondulatoires

2.1 Interférences acoustiques

🔥 Expérience

Trombone de König - [1]

On envoie à l'aide d'un haut-parleur une onde à l'entrée du trombone. Une partie de l'onde parcourt la branche gauche du trombone de longueur fixe. L'autre partie de l'onde parcourt la branche droite du trombone qui est mobile. En déplaçant la coulisse d'une distance D , on fait varier la longueur de la branche de $2D$. Au niveau de la sortie, les deux ondes se rejoignent et interfèrent. Entre deux maxima ou deux minima successifs, la différence de chemin acoustique a varié d'une longueur d'onde, soit $\lambda = 2D$. Le trombone étant un système fermé, il peut également développer des ondes stationnaires et un phénomène de résonance à l'intérieur de celui-ci, mais cela n'empêche pas l'observation des interférences.



On réalise alors la régression linéaire $D_n = n \frac{\lambda}{2} + \kappa$ en fonction de n pour remonter à la longueur d'onde λ de l'onde puis à la vitesse du son dans l'air $c_{\text{air}} = f \lambda$.

2.2 Effet Doppler

Considérons un émetteur ultrasonore qui émet une onde à la fréquence f . Si cet émetteur se rapproche d'un récepteur à la vitesse v , la fréquence détectée par le récepteur vaut, par effet Doppler :

$$f_{\text{mesurée}} = \frac{c_{\text{air}}}{c_{\text{air}} - v} f \quad (11)$$

Pour une vitesse v de l'émetteur de l'ordre de quelques cm s^{-1} , beaucoup plus faible que la vitesse du son dans l'air c_{air} , on peut alors développer cette expression au premier ordre et exprimer l'écart en fréquence dû à l'effet Doppler :

$$\delta f = f_{\text{mesurée}} - f \approx \frac{v}{c_{\text{air}}} f \ll f \quad (12)$$

Cet écart en fréquence est trop faible pour pouvoir distinguer f et $f_{\text{mesurée}}$ sur un oscilloscope. Nous allons alors réaliser une détection synchrone afin de mesurer δf . La détection synchrone consiste à multiplier le signal de fréquence inconnue $f_{\text{mesurée}}$ par le signal de fréquence connue f pour obtenir un signal contenant une composante harmonique à $2f + \delta f$ et une composante harmonique à δf . On filtre ensuite ce signal à l'aide d'un passe-bas afin de ne conserver que la composante à δf . On accède ainsi facilement à l'écart en fréquence dû à l'effet Doppler.

Pour $f \approx 40 \text{ kHz}$, on s'attend à avoir $\delta f \approx 10 \text{ Hz}$.

La détection synchrone repose sur le fait que pour :

$$U_{\text{émis}} = U_0 \cos(2\pi f t) \quad (13)$$

$$U_{\text{reçu}} = U_0 \cos(2\pi f_{\text{mesurée}} t + \varphi) \quad (14)$$

On a alors en multipliant les deux signaux (en notant A le gain du multiplieur) :

$$U_{\text{mult}} = \frac{U_{\text{émis}} U_{\text{reçu}}}{A} \quad (15)$$

$$= \frac{U_0 U_1}{A} \cos(2\pi f t) \cos(2\pi f_{\text{mesurée}} t + \varphi) \quad (16)$$

$$= \frac{U_0 U_1}{2A} \left[\cos(2\pi (f_{\text{mesurée}} - f) t + \varphi) + \cos(2\pi (f_{\text{mesurée}} + f) t + \varphi) \right] \quad (17)$$

$$= \frac{U_0 U_1}{2A} \left[\cos(2\pi \delta f t + \varphi) + \cos(2\pi (2f + \delta f) t + \varphi) \right] \quad (18)$$

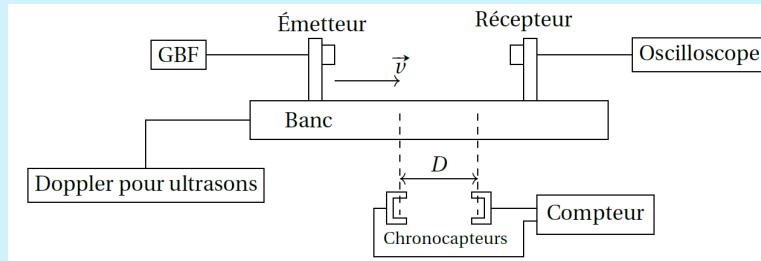
Ainsi, on récupère en sortie du filtre passe-bas de fonction de transfert H , de module h et de phase ϕ à la fréquence δf :

$$U_{\text{filtré}} = h \frac{U_0 U_1}{2A} \cos(2\pi \delta f t + \varphi + \phi) \quad (19)$$

☕ Expérience

Mesure de l'effet Doppler - [2]

On réutilise ici le montage de la première expérience mais en plus, on alimente le moteur permettant de déplacer à vitesse constante l'émetteur. On rajoute aussi deux chronocapteurs séparés d'une distance $D \approx 20$ cm détectant le passage de l'émetteur et permettant de mesurer précisément le temps de parcours T de la distance D . On remonte alors facilement à la vitesse de l'émetteur $v = \frac{D}{T}$.



Grâce à un multiplieur analogique, on multiplie le signal reçu et le signal émis. On filtre le signal en sortie du multiplieur grâce à un filtre passe-bas d'ordre 1 de type RC de fréquence de coupure $f_c \approx 16$ Hz. Pour cela, on peut utiliser $C = 1 \mu\text{F}$ et $R = 10 \text{ k}\Omega$. Un ordre 1 suffit amplement à la vue du grand écart entre les fréquences δf et $2f + \delta f$.

Pour différentes vitesses v de l'émetteur, on mesure par cette méthode, les différents écarts en fréquence δf . On réalise enfin la régression linéaire de v en fonction de $\frac{\delta f}{f}$ afin de remonter directement grâce au coefficient directeur à une mesure de la vitesse du son dans l'air c_{air} .

2.3 Propagation guidée

Les longueurs d'ondes des ondes guidées à travers deux plaques infinies séparées d'une distance a valent :

$$\frac{1}{\lambda_{g,n}^2} = \frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_{c,n}^2} \quad \text{avec} \quad \lambda_{c,n} = \frac{2a}{n} \quad (20)$$

avec $n \in \mathbb{N}^*$ et où λ correspond à la longueur d'onde de l'onde libre. Le mode n peut alors se propager que si $\lambda < \lambda_{c,n}$ qui est donc une longueur de coupure haute. L'expression précédente peut être interprétée

comme une relation de dispersion pour les longueurs d'onde des ondes guidées $\lambda_{g,n}$ et dont on peut calculer une vitesse de groupe :

$$v_{g,n} = \frac{d\omega}{dk_{g,n}} = c \frac{\lambda}{\lambda_{g,n}} < c \quad (21)$$

avec $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$ et $k_{g,n} = \frac{2\pi}{\lambda_{g,n}}$. On constate alors que les modes guidés sont plus lents que le mode libre.

Dans le cas du guide cylindrique, les modes guidés possèdent des longueurs d'onde ayant une expression semblable à l'expression précédente. Ils sont ici repérés par deux entiers $(n, m) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}^*$:

$$\frac{1}{\lambda_{g,n,m}^2} = \frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_{c,n,m}^2} \quad \text{avec} \quad \lambda_{c,n,m} = \frac{\pi a}{\mu_{n,m}} \quad (22)$$

avec $\mu_{n,m}$ un coefficient numérique relié aux fonctions de Bessel. Pour plus de précisions concernant les rappels théoriques, on peut aller voir [2] p.521.

Dans le cas de notre expérience, l'excitation est bien monochromatique et se fait avec un certain angle d'ouverture. On peut alors exciter divers modes guidés en changeant cet angle. En pratique, on tourne l'émetteur pour faire apparaître divers modes guidés.

Expérience

Guide d'onde - [2]

On intercale entre un émetteur et un récepteur ultrasonore un long tuyau en PVC (environ 2 m). On compare alors le signal reçu par transmission à travers le tube avec un signal reçu sans le tube (et en faisant attention à retirer les signaux parasites reçus dûs aux réflexions sur les supports en plastique en plaçant des mousses devant l'émetteur et le récepteur).

On remarque que la propagation d'ondes guidées fait apparaître de nouveaux signaux qui arrivent après la propagation libre du signal dans l'air. De plus, en faisant tourner l'émetteur (ou le récepteur) autour de l'axe du tube on fait apparaître d'autres modes guidés.

Conclusion

Compléments

Manipulation surprise

Mesure de l'épaisseur d'un cheveu par diffraction

On relie directement la taille d de la tâche principale de diffraction et la distance D écran-diapositive à la longueur d'onde λ du laser et à l'épaisseur a du cheveu par l'angle de diffraction θ :

$$\theta = \frac{\lambda}{a} = \frac{d/2}{D} \quad (23)$$

- **Quelles incertitudes mettre sur la mesure de la largeur du cheveu ? A quoi est reliée l'incertitude sur la tâche ?** Incertitude plus grande sur la taille de la tâche que sur la distance de l'écran car on prend la même règle mais $D \gg d$.
- **Quelle est l'incertitude-type d'une règle graduée ?** graduation/ $\sqrt{3}$.

Questions

- **Pourrais-tu finaliser la manipulation "Guide d'onde" ?** (manque de temps)
- **Commenter le choix des ondes dans les différentes expériences. Fréquences pertinentes ?**
On se place aux fréquences de résonance pour chacun des couples émetteurs-récepteurs pour un maximum d'amplitude.

- **Ordre de grandeur des longueurs d'onde ?** Du centimètre (pour les ultrasons) à la dizaine de centimètres (pour le trombone)
- **Quelle est l'influence de votre voix sur les mesures ? Risque d'interférences ?** Aucune car les récepteurs ultrasonores sont sensibles à une gamme de fréquence qui n'est pas celle de la voix. Et le micro est sensible qu'à une petite zone autour de lui.
- **Quelles sont les fréquences audibles pour les humains ?** 20 Hz-20 kHz
- **Et les fréquences de la voix ?** 200 Hz-400 Hz
- **Quelle est l'expression de la vitesse du son dans l'air ?** Pour un gaz parfait, $c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$.
- **Quand est-ce qu'un gaz se comporte comme un GP ?** A basse pression.
- **Autres hypothèses pour obtenir l'équation des ondes sonores ?** Se placer dans le cadre de l'approximation acoustique et dans le cadre de l'hypothèse de compressibilité isentropique (i.e. adiabatique), ce qui revient à définir la compressibilité isentropique (constante) $\chi_S = -\frac{1}{V} \left. \frac{\partial V}{\partial P} \right|_S$
- **Dans l'approximation acoustique on n'a pas de vitesse globale de fluide. Et si on a du vent ?** On se place dans le référentiel du vent. **Qu'est-ce que ça modifie dans le référentiel fixe ?** Analogue à l'effet Doppler.
- **Dans le cadre de l'effet Doppler on a vu l'amplitude reçue varier périodiquement en bougeant le récepteur. A quoi cela est dû ?** Variation de l'orientation du récepteur.
- **Commenter la valeur trouvée : la vitesse de l'air est sur-estimée et on n'a pas la vraie célérité dans la barre d'incertitudes.** Mesure plus précise avec une régression linéaire et beaucoup de sources d'incertitudes.
- **Qu'est-ce que c'est 342 m s^{-1} ?** Célérité des ondes sonores dans l'air à 17°C . Il faudrait vérifier la température ici.
- **Pourquoi les ondes sonores vont plus vite dans les solides, moins dans les liquides et encore moins dans les gaz ?** Densité plus élevée donc atomes plus proches donc propagation de l'information de proche en proche plus rapides.
- **Sur quelle propriété d'un matériau repose la propagation ?** La compressibilité. Elle est plus grande dans un solide et plus faible dans un gaz.
- **A propos des ondes P et S. De quoi dépendent leurs célérités ?** Module d'Young et coefficient de Poisson.
- **Qu'est-ce qu'on retrouve dans ces coefficients ?** Young : contrainte normale (compression); Poisson : contrainte tangentielle (cisaillement).
- **Quelle est l'onde de compression / cisaillement ?** Compression P, cisaillement S.
- **Pourquoi quand on envoie des ondes dans l'eau on envoie un burst et on récupère un signal plus étalé ?** C'est dû à l'émission de l'émetteur et à la réponse du récepteur. C'est analogue à un passe-bande.
- **La vitesse mesurée est la vitesse de groupe ou de phase ? Quelle est la signification de chacune ? Comment mesurer l'autre ?** Vitesse de phase : mesurer le début du paquet, vitesse de groupe : mesurer le milieu du paquet. Du coup, mesurer l'arrivée du max est physiquement plus pertinent car ça colle avec la vitesse de l'énergie et donc la vitesse de groupe.

- **Eau : pourquoi avoir fait une régression linéaire et pas affine ? Qu'est-ce que ça changerait ?** Affine : on prend en compte une éventuelle erreur systématique. Pour l'eau, ça pourrait venir d'une mesure du paquet d'onde au mauvais endroit. Il faut aussi prendre en compte le temps de réponse du capteur qui est constant.
- **La valeur tabulée de la célérité dans l'eau est hors barres d'incertitude. Commenter.** Incertitudes très sous-estimées : on était à $\pm 0.7\%$, c'est pas beaucoup beaucoup. L'incertitude sortie par Régressi est douteuse.
- **Quelle est l'incertitude sur les fréquences ? Est-ce qu'elle est à prendre en compte ?** Un peu difficile à préciser il faudrait regarder les notices des GBF. Elles sont clairement négligeables.
- **Que se passe-t-il si on n'a pas $v \ll c$ pour l'effet Doppler ?** $f_{\text{mesurée}} = \frac{c}{c-v} f$.
- **Et donc ça change quoi par rapport à la vitesse du vent ?** On sort de l'approximation acoustique. On sort du cadre linéaire de la résolution.
- **Pourquoi avoir choisi ces manipulations ?** Pour montrer la propagation libre / guidée des ondes, pour avoir l'influence du matériau, pour déterminer les propriétés essentielles de l'onde.
- **Dans des cas concrets, comment on perçoit l'effet Doppler ?** Ambulance en mouvement.
- **Et pour les ondes S et P ?** Les séismes ("question de vie ou de mort d'après Benjamin"). Quand la première onde est passée, il faut se mettre vite à l'abri parce qu'on va avoir une "réplique" (onde S).
- **L'effet Doppler ça marche uniquement avec les ondes acoustiques ?** Non, avec les ondes électromagnétiques aussi. **Applications ?** GPS, mouvement des galaxies...
- **Et application pour les ultrasons ?** Radar, sonar...
- **Comment fonctionne un haut-parleur ?** Mouvement d'un aimant dans un champ magnétique qui fait bouger une membrane ou mouvement d'une membrane polarisée dans un condensateur (voir [2])
- **En quoi le trombone n'est pas un guide d'onde ? En quoi la vitesse du son est mesurable avec ce dispositif alors que ça ne marche pas avec le guide d'onde ?**

Commentaires

- Éviter les incertitudes à 2 chiffres significatifs. Même si c'est entre 1 et 2, arrondir au-dessus et surestimer les incertitudes.
- Tableau très bien tenu. Toujours une valeur théorique pour la comparaison, c'est bien. Par contre, il faut commenter l'écart et trouver une justification si c'est pas bon.
- Mesures de la vitesse du son dans l'air : envisager de changer, ou au moins de comparer les méthodes.
- Guide d'onde : c'est cool mais chaud à tenir dans le timing. A la limite ça peut venir comme remarque plus que comme manip.
- Ne pas oublier d'échanger les écrans PC et oscillo.
- Faire passer un message plus accrocheur dans l'introduction. Avoir un véritable objectif. Montrer les enjeux et intérêts.
- Envisager une manip introductive avec un réveil sous une cloche à vide qu'on finit par ne plus entendre. (Attention, il y a toujours de l'air pour propager le son mais on n'entend plus parce qu'on change l'impédance de l'interface air-verre)
- Manipulation surprise : très bonne démarche, mais garder les incertitudes jusqu'au bout.

- Attention aux réflexions du laser sur la règle en métal. Mise en danger d'autrui. D'ailleurs, préciser à voix haute qu'on y fait attention.
- Envisager de garder un peu de place sur le tableau pour la manip surprise.