LP25 – Ondes acoustiques

29 juin 2020

Laura Guislain & Pascal Wang

Niveau :

Commentaires du jury

Bibliographie

✍ *Le nom du livre*, **l'auteur** [1]

⟶ Expliciter si besoin l'intérêt du livre dans la leçon et pour quelles parties il est utile.

Prérequis

- gaz parfait
- équations fondamentales de la mécanique des fluides
- équations de conservation ?
- Câble coaxial ?

Expériences

- Biréfringence du quartz

Table des matières

1 Modélisation des ondes acoustiques **3**
1.1 Cadre et hypothèses . . . 3
1.2 Equation de propagation . . . 4
1.3 Célérité des ondes acoustiques dans un fluide . . . 5
1.4 Cas d'un milieu solide ? prérequis ? . . . 5

2 Propagation des ondes acoustiques **5**
2.1 Structure de l'onde acoustique . . . 5
2.2 Aspect énergétique . . . 6
2.3 Intensité sonore . . . 8
2.4 Retour sur les hypothèses . . . 9

3 Interfaces et résonance **9**
3.1 Coefficients de passage . . . 10
3.2 Modes propres d'une cavité . . . 11

Lire les livres : Bréal, Sanz, HPrepa, CapPrepa, Garing

Préparation

Ressources : animations ondes https://www.acs.psu.edu/drussell/demos.html

Biblio : Fiche et Sanz pour les calculs, Sanz, HPrépa, Renvoisé (Cap Prépa), Boulomié (compléments)

Plan : rendre la leçon plus concrète avec des odg et des commentaires : contextualization is king!! S'aider des exemples du Garing, vidéos youtube

Manip :

Passage :

Questions : sphère pulsante (analogue du rayonnement dipolaire en ω^4), causes d'atténuation ✍ Garing, échographie, cône de mach, fiche, fiche ondes dans les solides, effet doppler, détection synchrone, application surpression/surtempérature (crevette pistolet), sonoluminescence, analogie acoustique de l'indice optique, lois de Descartes, rayonnement dipolaire en ω^4 (sphère pulsante), mirages, eikonale (equation des rais sismiques), Si I = 60 dB et I' = 30 dB que vaut le rapport des deux surpressions associées à ces intensités

Introduction

Camille : Qu'est-ce que c'est exactement, une onde sonore ? Il est facile de se convaincre que la production de son est liée à une vibration mécanique, en mettant ses doigts sur la gorge quand on parle, ou en observant un haut-parleur en fonctionnement. On a un déplacement de membrane, qui va donc mettre en mouvement l'air à proximité.Son = onde de compression-dilatation de fréquence audible (20 Hz - 20kHz)Mais ce phénomène existe aussi à d'autres fréquences, inaudibles => ondes acoustiques.Nécessité d'un milieu matériel.Objectif : s'intéresser à la propagation du son dans des fluides. + MANIP mise en évidence de la propagation du son.

Corentin : Ce qu'on entend habituellement par onde acoustique ce sont les ondes sonores, le son que l'on est capable de percevoir. Cependant, ce terme englobe les ondes mécaniques dans les milieux élastiques et comprend donc non seulement la propagation dans l'air, les solides ou les liquides, mais aussi les ondes ayant des fréquence inaudibles (ultrasons au delà de 25 kHz et infrasons en deçà de 20 Hz). On se concentrera dans un premier temps sur les ondes acoustiques dans les fluides afin de mettre en évidence certaines propriétés des ondes sonores

Pascal : Que se passe-t-il quand on parle et quand on entend ? Qu'est-ce que c'est exactement, une onde sonore ? On se convainc facilement que la production de son est liée à une vibration mécanique, en mettant ses doigts sur la gorge quand on parle, ou en observant un haut-parleur en fonctionnement. On a un déplacement de membrane, qui va donc mettre en mouvement l'air à proximité. On montre cette video de haut parleur en ralenti : `https://www.youtube.com/watch?v=Qu5sqpFDYn8`. L'air en mouvement voit sa pression et sa masse volumique varier, ce qui met aussi en mouvement les particules fluides adjacentes : de proche en proche, la perturbation se propage. En fait, une onde sonore est une onde de compression-dilatation de fréquence audible (20 Hz - 20kHz). Mais ce phénomène existe aussi à d'autres fréquences. Plus généralement, pour des fréquences quelconques, on parle d'ondes acoustiques.

Propagation des ondes sonores et estimation de la vitesse du son
On place deux micro à une distance L, on clappe des mains et on observe le retard entre les deux signaux à l'oscilloscope. On connait L et on estime v. On peut le faire dans l'eau et dans l'air et montrer la différence. Attention aux réflexions sur la table, qui peuvent déformer le signal. Mesurer la température de la pièce avec un thermomètre ! La valeur trouvée peut dépendre de l'humidité.

De plus, comme l'indique le poster du FIlm Alien (1979) "In space no one can hear you scream", cette pub d'oeuvre de fiction se base sur un fait physique : les ondes acoustiques ne se propagent pas dans le vide : un milieu matériel est nécessaire.

Objectif : On a les outils de la mécanique des fluide. oN va les utiliser pour modéliser la propagation du son dans des fluides + structure + aspects énergétique + lien avec les décibels

1 Modélisation des ondes acoustiques

Voir ma fiche pour les calculs et dessins et détails.

Origine microscopique de la propagation : couplage entre les grandeurs presOn montre le code python Montrouge : déplacement de poussière dans une onde sonore. Sinon ces animations sont top aussi :`https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves/wavemotion.html`. On voit bien l'aspect onde de compression/dilatation avec les zones de surpression/raréfaction. En suivant le point rouge, on voit qu'il n'y a pas de transport global de matière. Microscopiquement, ce sont les chocs entre particules qui propagent le son. Discuter de l'aspect microscopique est important. On voit qu'il y a trois grandeurs associées à l'onde : densité pression et champ de vitesse. On va les étudier.

Caractéristiques de la propagation acoustique (i) La présence d'un milieu matériel est nécessaire. (ii) La propagation des ondes sonores résulte du couplage entre les variations de pression et le déplacement des particules de fluides.

1.1 Cadre et hypothèses

Position du problème On s'intéresse à des perturbations d'un état au repos. p_1 est la pression acoustique ou surpression. $v_0 = 0$ fluide au repos, $v_1 \ll c$ *(de manière équivalente, l'amplitude spatiale des oscillations est petite devant la longueur d'onde)* à vérifier a posteriori. L'approximation acoustique est une approximation de grande longueur d'onde. Pour l'instant, on considère un fluide quelconque. C'est quand on a besoin de la loi de Laplace qu'on indique qu'on considère un gaz parfait

Hypothèses On projette la liste des hypothèses et on les reprend en les explicitant au tableau Tous les infiniment petits introduits doivent être du même ordre.

Décompte des équations et inconnues On rappelle les équations de la mécanique des fluide : équation d'Euler et conversation de la masse Ici, pour l'équation manquante, on fait une hypothèse d'adiabaticité, qui permet de relier P_1 et ρ_1. Ainsi, on considère un gaz parfait *On aurait pu utiliser l'équation d'état du gaz parfait, qui aurait introduit la température T comme nouvelle variable. Il faut alors utiliser la conservation de l'énergie qui est de type advection/diffusion pour T pour fermer le système.*

Justification de l'hypothèse d'adiabaticité ✍ Sanz. Dans le cadre de la propagation dans l'air, on estime le temps caractéristique de diffusion thermique sur une longueur d'onde λ : $\tau_{diff} = \lambda^2/D_{th}$, temps caractéristique de variation des grandeurs sur λ : $\tau_{var} = \lambda/c$ avec le coefficient de diffusion thermique de l'air. $D_{th}(air) = 2.10^{-5} m^2/s$ et la célérité des ondes sonores dans l'air (estimée en introduction) : $c(air) \sim 340 m/s$. Pour que l'adiabaticité soit respectée, il faut $\tau_{var} \ll \tau_{diff}$, soit $f \ll c^2/D_{th}$ soit $f \ll 6$ GHz. L'adiabaticité est respectée pour f entre 20 Hz et 20 kHz pour les ondes sonores et pour une bonne partie des ultrasons, même les ultrasons utilisés en échographie à < 10 MHz *(émis par des transducteurs piézoélectriques)*. Cela équivaut à dire que $\lambda \gg l_p$ avec $l_p \sim 68nm$ le libre parcours moyen. Dans une transformation adiabatique, les molécules subissent trop de chocs pour avoir le temps de migrer des régions chaudes vers les régions froides : les échanges thermiques n'ont pas le temps de se faire. *Laplace justifiait son hypothèse d'adiabaticité par le fait que la fréquence est tellement élevée que la thermalisation ne se fait pas. Au contraire, c'est à basse fréquence que l'adiabaticité est vérifiée.*

Bonus : adiabaticité dans un fluide Dans le cas d'un liquide comme l'eau, la diffusivité thermique est de l'ordre de $10^{-7}\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{s}^{-1}$ et la célérité des ondes sonores de l'ordre de $1500\mathrm{m.s}^{-1}$ donc $\frac{T^\star}{T^\star_{\mathrm{diff}}} < 10^{-9}$: l'hypothèse de transformation adiabatique est donc également vérifiée.

Bonus : hypothèse isotherme Il faut en pratique vérifier que c'est valable pour chaque fluide. On ne le fera pas dans cette leçon. *En général, cette approximation est vérifiée. Historiquement, savoir s'il fallait considérer la transformation comme isentropique ou adiabatique a fait débat, notamment entre Newton et Laplace. La différence entre les deux engendre une variation de la célérité de l'ordre $\sim \sqrt{\gamma}$. À titre de remarque, il existe des situations (notamment en astrophysique) où ces échanges thermiques se font très rapidement. On doit alors utiliser χ_T le coefficient de compressibilité isotherme.*

↓ *On résout.*

1.2 Equation de propagation

Couplage dans les équations Les deux équations relient les variations spatiales aux variations temporelles de la vitesse particulaire et de la surpression. C'est ce couplage qui est à l'origine de la propagation. Dans le cable coaxial c'est la tension u(x,t) et l'intensité i(x,t) qui sont couplées. Nous verrons dans le cas des ondes électromagnétiques que la propagation résulte là aussi du couplage entre les variations temporelles et les variations spatiales du champ électrique et du champ magnétique.

Coefficient de compressibilité On le prend isentropique car on a supposé les transformations adiabatique (cf. hypothèses) et réversibles (pas de viscosité/diffusion).

> Ici, dans nos hypothèses, χ_S ne dépend que de l'état au repos, pas de la perturbation. C'est ne pas le cas en général. Ici, ce sont nos hypothèses d'évolution adiabatique réversible d'un gaz parfait qui le garantissent.

Equation de d'Alembert pour $\vec{v}_1$, ρ_1 et p_1. On en fait un et on laisse les autres en exercice. Victoire ! On a trouvé une équation d'onde avec le modèle ! Il faut être content :)

Célérité

> Elle se met sous la forme racine d'une raideur sur une inertie, comme dans le solide. *C'est assez général.*

.

▌ *Application numérique et vérification des hypothèses*

↓

1.3 Célérité des ondes acoustiques dans un fluide

Hypothèse L'air est un gaz parfait. En première approximation, l'air est composé de 79% de diazote et 21% de dioxygène.

Compressibilité isentropique du gaz parfait [calcul]

Application numérique On projette le calcul On trouve la bonne valeur, cela justifie les hypothèses, notamment celle d'adiabaticité. On peut mentionner à l'oral qu'on aurait trouvé une valeur différente si on avait pris des transformations isothermes, ce qui valide l'hypothèse d'adiabaticité.

Commentaire des dépendance (i) γ : mono vs diatomique (ii) M : air vs hélium. Cela change les conditions de résonance pour les cordes vocales : on parle aigu (*revenir dessus plus tard*) ! (iii) indépendance en P_0 mais si $P \ll P_0$, l'approximation des milieux continus est remise en question et si $P \gg P_0$, on s'écarte du comportement de gaz parfait. (iv) dépendance en T : interprétation microscopique : augmenter la température augmente les chocs donc la vitesse du son (pas sûr), là on a juste fait un modèle "élastique" macro réfraction au-dessus d'un lac gelé, nécessité d'accorder des instruments de musique. *Mirages acoustiques (dans d'une atmosphère avec le bon profil de température). Par exemple quand on envoie une onde acoustique dans le ciel, elle peut être renvoyée vers le sol par cet effet de mirage. C'est un cas où la vitesse du son varie continûment avec z.*

Application numérique pour l'eau Le coefficient de compressibilité d'un liquide dépend assez peu des conditions expérimentales. D'autre part, il est beaucoup plus faible que dans le cas d'un gaz. Pour l'eau par exemple, il vaut $\chi_0 = 5,0 \times 10^{-10}\text{Pa}^{-1}$. La masse volumique de l'eau étant de $1,0 \times 10^3\text{kg.m}^{-3}$, la célérité du son dans l'eau est égale à : $c = 1,4 \times 10^3\text{m.s}^{-1}$ La célérité du son dans un liquide est environ 5 fois plus grande que dans un gaz. L'eau est 1000 fois plus dense mais moins compressible. Bien que la masse volumique d'un liquide soit environ mille fois plus grande que celled'un gaz et que son coefficient de compressibilité soit beaucoup plus faible, le produit $\mu_0\chi_0$ est du même ordre de grandeur, ce qui fait que la célérité du son est du même ordre de grandeur dans un liquide que dans un gaz.

1.4 Cas d'un milieu solide ? prérequis ?

Expression de la célérité On a décrit la propagation d'ondes sonores dans un fluide. Or, de telles ondes peuvent aussi se propager dans un solide. On ne détaillera pas autant la méthode. Que ce soit dans un fluide ou dans un solide, la célérité des ondes sonores s'écrit comme la racine d'un rapport entre une grandeur caractérisant la raideur du milieu et une autre grandeur caractérisant l'inertie. [expression]

Ordres de grandeur ODG: tableau. On retiendra que généralement cgaz < cliquide < csolide.

2 Propagation des ondes acoustiques

2.1 Structure de l'onde acoustique

Relation de dispersion Les équations que l'on a obtenu dans l'approximation acoustique sont des équations linéaires (c'est un peu tout l'intérêt de cette approximation) : on peut utiliser le formalisme complexe pour écrire une solution en onde plane [expression] Injecter cette solution dans l'équation de d'Alembert nous donne la relation de dispersion $\omega^2 = c^2k^2$. Sinon, la donne directement puisque l'équation de d'Alembert est en prérequis

Structure de l'onde acoustique Injecter cette solution dans l'équation d'Euler linéarisée nous donne la relation de structure de l'onde sonore. Le calcul est sur la fiche. L'onde sonore est une onde longitudinale. Les ondes de surpression et de vitesse sont en phase. Comme $\chi_s = \rho_1/(\rho_0 p_1) = 1/(\gamma p_0)$, p_1 et ρ_1 sont en phase.

Bonus : viscosité et milieu stratifié Si on avait pris en compte la viscosité, on aurait eu des ondes de cisaillement mais qui sont atténués exponentiellement style effet de peau (mais pas de raideur en cisaillement comme les solides). Dans un milieu stratifié, on peut avoir des ondes internes, qui peuvent être transverses. Elles ont parfois des vitesses de phase et des vitesses de groupe non colinéaires.

Bonus : irrotationnalité de l'écoulement $\partial_t v_1$ est proportionnel au gradient de pression donc l'écoulement est irrotationnel.

Impédance acoustique Faire cela plus tard ? De manière générale, Z=(grandeur intensive)/(débit de grandeur extensive). On définit alors l'impédance acoustique [expression.] L'impédance acoustique est réelle. Le signe de l'impédance dépend du sens de propagation. Physiquement, l'impédance acoustique d'un milieu pour une onde acoustique caractérise la résistance du milieu au passage de cette onde. L'impédance acoustique d'un liquide est environ 5000 fois plus grande que celle d'un gaz : en effet, la masse volumique d'un liquide est environ 1000 fois plus grande que celle d'un gaz et la célérité du son dans un liquide environ 5 fois plus importante que dans un gaz. Plus précisément, les impédances acoustiques de l'eau et de l'air sont :**ODG:** $Z_{\text{eau}} = 1,4 \times 10^6 \text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$et $Z_{\text{air}} = 410 \text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. mais un peu plus grande car μ_0 et c sont légèrement plus importantes. Pour un solide, Z_a est du même ordre de grandeur que pour un liquide, **ODG:** solide, liquide, gaz.

$$Z_{sol} > Z_{liq} \gg Z_{gaz}$$

. Exemple : propagation à l'interface air/eau $Z_{\text{air}} = 415 \text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ et $Z_{\text{eau}} = 1.5 \times 10^6 \text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Bonus : impédance de rayonnement On prend souvent pour les tuyaux et autres instruments de musique "ouverts" la condition $Z = 0$ à l'ouverture du tube. Cependant, cette condition est fausse, sinon il n'y aurait pas d'onde qui sortirait de l'instrument ! En réalité, l'impédance à la sortie est appelée impédance de rayonnement, et est reliée aux sources acoustiques. L'impédance de rayonnement d'une source, Z_r, est définie comme

$$Z_r = \int_S \frac{\mathrm{d}f_S}{\mathbf{u}}$$

où u est la vitesse de la surface considérée (souvent forcée par l'expérimentateur, cf le haut-parleur) et $\mathrm{d}f_S$ est la composante normale de la force appliquée sur la surface (par exemple la force de pression). C'est en quelque sorte une mesure de "l'inertie du fluide à faire bouger".

Pour un haut-parleur (piston plan), on se rappelle que la vitesse en tout point du haut-parleur est tout simplement $V_a \mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}$. Pour la force, c'est un peu plus compliqué. Pour trouver la pression en un point P de la source, on doit sommer style Huyghens-Fresnel la pression additionnelle correspondant à chacune des sources secondaires en $P' \neq P$, puis refaire l'intégrale du résultat pour trouver Z_r. On ne va pas le faire ici, mais on peut donner le résultat (Kinsler, p. 186) pour le piston de rayon a :

$$Z_r = \mu_0 c \pi a^2 \left(1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} + \mathrm{i}\frac{H_1(2ka)}{ka}\right)$$

avec J_1 la fonction de Bessel du premier ordre et H_1 la fonction de Struve du premier ordre. Dans la limite basse-fréquence ($ka \ll 1$, qui est celle qui nous sert pour les instruments de musiques si on ne veut pas exciter les modes nm du guide d'onde...) on a tout simplement

$$Z_r = \mu_0 c \pi a^2 \left(\frac{(ka)^2}{2} + \mathrm{i}\frac{8}{3\pi}ka\right)$$

Si on remet cette impédance dans les conditions de résonance d'une flute par exemple, on se rend compte que cela revient (toujours dans la limite de basse fréquence) à considérer un guide de longueur $L + 8a/3\pi$ au lieu de L, avec a le rayon du guide. Il faut donc prendre cela en compte dans la conception de l'instrument.

Il reste des hypothèses non vérifiées : les hypothèses acoustiques. Pour les vérifier, on va d'abord faire une étude énegétique.

2.2 Aspect énergétique

✍ Sanz On peut aussi faire cette partie par analogie avec l'électromagnétimsme et faire l'analogie et/ou calculs sur transparents pour gagner du temps

Vecteur densité de courant énergétique On commence par introduire le vecteur de Poynting "sonore". On cherche ensuite l'expression de l'énergie cinétique d'une PF. En revanche, on a pas l'expression de l'énergie potentielle : on établit alors le bilan d'énergie total, et on donne la conservation de l'énergie (assez naturelle puisqu'on a aucun phénomène de dissipation !). On pourrait partir de l'équation de conservation, mise en prérequis, pour aller plus vite

On se donne un volume de fluide V, entouré par la surface S. L'énergie totale contenue dans ce volume, au vu de nos hypothèse, est l'énergie cinétique totale de toutes les particules présentes dans V, soit

$$\mathcal{E}(t) = \int_V \frac{1}{2}\mu_0 \mathbf{v}_1^2 \mathrm{d}V$$

Comment cette énergie varie-t-elle au cours du temps ? Pour le savoir, on a besoin de la puissance des forces qui s'exercent sur ce volume, c'est-à-dire de la puissance des forces de pression. On trouve à l'aide d'un schéma très classique que cette puissance est donnée par

$$\mathcal{P} = \oint_S P(M,t)\mathrm{d}\mathbf{S} \cdot \mathbf{v}_1(M,t)$$

On peut donc écrire une équation de conservation pour l'énergie

$$\mathcal{E}(t+\mathrm{d}t) - \mathcal{E}(t) + P\mathrm{d}t = 0$$

dont la version locale est

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{\Pi} = 0$$

avec $e(t) = \frac{1}{2}\mu_0 \mathbf{v}_1^2$ la densité volumique d'énergie cinétique et $\mathbf{\Pi} = P\mathbf{v}_1$ l'équivalent du vecteur de Poynting pour l'acoustique. Il s'exprime en W/m^2

Calcul de la puissance La puissance transférée à travers une surface $\mathcal{S}$ est la puissance des forces de pression, soit :

$$\mathcal{P} = \iint_{M\in\mathcal{S}} \left(P_0 + p_1(M,t)\right) \overrightarrow{\mathrm{d}S}_M \cdot \vec{v}_1(M,t)$$

Cette puissance s'écrit comme le flux du vecteur $(P_0 + p_1)\,\vec{v}_1$ à travers la surface $\mathcal{S}$. Nous pouvons alors définir le vecteur densité de courant d'énergie, que nous noterons $\vec{\Pi}$ (et que nous appellerons parfois vecteur de Poynting sonore par analogie avec le vecteur de Poynting du champ électromagnétique) par :

$$\vec{\Pi}(M,t) = \left(P_0 + p_1(M,t)\right)\vec{v}_1(M,t)$$

Il est composé d'un terme d'ordre $1, \overrightarrow{\Pi_1}(M,t) = P_0\vec{v}_1(M,t)$, dont la valeur moyenne temporelle est nulle dans le cas d'une onde plane progressive sinusoidale, et d'un terme d'ordre 2 $\vec{\Pi}_2(M,t) = p_1(M,t)\vec{v}_1(M,t)$ qui permet d'exprimer le transfert d'énergie du à la surpression donc aux ondes sonores.

Expression de l'énergie Une particule de fluide de volume $\mathrm{d}\tau_M$, située au point M à l'instant t possède l'énergie cinétique $\mathrm{d}E_c(M,t) = \frac{1}{2}\mu(M,t)v_1^2(M,t)\mathrm{d}\tau_M$. Au premier ordre non nul, l'ordre 2 ici, cette énergie cinétique s'écrit :

$$\mathrm{d}E_c(M,t) = \frac{1}{2}\mu_0 v_1^2(M,t)\mathrm{d}\tau_M = e_C(M,t)\mathrm{d}\tau_M$$

ce qui définit la densité volumique d'énergie cinétique :

$$e_C(M,t) = \frac{1}{2}\mu_0 v_1^2(M,t)$$

Ce terme est d'ordre 2 en $\frac{v_1}{c}$ Quand la particule de fluide précédente est au repos, sa pression est P_0 et son volume $\mathrm{d}\tau_{M,0}$ En présence de l'onde sonore, sa pression est $P = P_0 + p_1$ et son volume d τ_M. Le travail des efforts de pression est stocké sous forme d'énergie potentielle par la particule de fluide : il est emmagasiné au cours des phases de compression, où la particule de fluide augmente son énergie potentielle, et transmis au reste du fluide au cours des phases de détente, où la particule de fluide voit son énergie potentielle diminuer. La particule de fluide possède l'énergie potentielle :

$$\mathrm{d}E_P(M,t) = e_P(M,t)\mathrm{d}\tau_M$$

où $e_P(M,t)$ est la densité volumique d'énergie potentielle. Comment l'exprimer en fonction des champs de pression et/ou de vitesse ? Pour ce faire, on va effectuer le bilan énergétique d'un volume de fluide quelconque. On définit la densité volumique d'énergie $e(M,t)$ par : $e(M,t) = e_c(M,t) + e_P(M,t)$

Expression de l'énergie potentielle On cherche $e_P(x,t)$ solution de l'équation :

$$\frac{\partial e_P}{\partial t} + \frac{\partial\left(\frac{1}{2}\mu_0 v_1^2\right)}{\partial t} + \frac{\partial\left(P_0 v_1 + p_1 v_1\right)}{\partial x} = 0$$

Cette équation s'ccrit :

$$\frac{\partial e_P}{\partial t} = -\mu_0 v_1 \frac{\partial v_1}{\partial t} - P_0 \frac{\partial v_1}{\partial x} - p_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} - v_1 \frac{\partial p_1}{\partial x}$$

Compte tenu des cations couplécs (26.7), on obticnt :

$$\frac{\partial e_P}{\partial t} = -\mu_0 v_1 \frac{\partial v_1}{\partial t} + P_0 \chi_0 \frac{\partial p_1}{\partial t} + \chi p_1 \frac{\partial p_1}{\partial t} + \mu_0 v_1 \frac{\partial v_1}{\partial t}$$

Ce qui se simplific en :

$$\frac{\partial e_P}{\partial t} = +P_0 \chi_0 \frac{\partial p_1}{\partial t} + \chi_0 p_1 \frac{\partial p_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}\left(P_0 \chi_0 p_1 + \frac{1}{2}\chi_0 p_1^2\right)$$

La densité volumique d'énergic potenticlle cst donc composéc de deux termes : un terme d'ordre 1 : $e_{P1}(x,t) = P_0\chi_0 p_1(x,t)$ un terme d'ordre 2 : $e_{P2}(x,t) = \frac{1}{2}\chi_0 p_1^2(x,t)$ Par ailleurs, on remarque que $\frac{\partial e_{P1}}{\partial t}(x,t) + \frac{\partial \Pi_1}{\partial x}(x,t) = 0$ cn remplaçant $e_{P1}(x,t)$ ct $\Pi_1(x,t)$ par leurs expressions respectives. On cn déduit donc que $\frac{\partial e_c}{\partial t}(x,t) + \frac{\partial e_{P2}}{\partial t}(x,t) + \frac{\partial \Pi_2}{\partial x}(x,t) = 0$ Le bilan énergétique locale est donc est vérifié à chaque ordre d'approximation.

Alternative : expression de l'énergie par analogie avec le câble coaxial Le déplacement du fluide s'accompagne d'une petite variation de sa masse volumique sous l'effet de la surpression. Le travail reçu, analogue à l'énergie potentielle élastique accumulée par un ressort dont la longueur a varié par rapport à sa valeur au repos, pourra être restitué sous forme d'énergie cinétique. Nous avons défini une densité linéique d'énergie dans un câble coaxial $e = \frac{1}{2}\Lambda i^2 + \frac{1}{2}\Gamma v^2$. En poursuivant l'analogie vitesse $\Leftrightarrow$ intensité surpression $\Leftrightarrow$ tension, $\rho_0 \Leftrightarrow \Lambda, \chi_S \Leftrightarrow \Gamma$, nous pouvons définir la grandeur $e_S = \frac{1}{2}\rho_0 v^2 + \frac{1}{2}\chi_S p^2$ homogène à une densité volumique d'énergie. L'interprétation du premier terme est simple, c'est 1'énergie cinétique volumique du fluide $e_K = \frac{1}{2}\rho_0 v^2$ Le deuxième terme est plus délicat à interpréter. Nous admettrons qu'il correspond au surcroît d'énergie interne du à la compressibilité du fluide Nous dirons que le terme $e_P = \frac{1}{2}\chi_S p^2$ correspond à l'énergie potentielle volumique associée à l'onde sonore

Bonus : interprétation thermodynamique de l'énergie potentielle ✍ Brébec ou ma fiche. C'est une énergie potentielle interne.

Cas d'une onde plane, vitesse de transport de l'énergie ✍ Sanz *Facultatif. En considérant une onde plane progressive, en calculant la puissance surfacique et la densité d'énergie correspondants, on déduit par rapport la vitesse de transport de l'énergie, égale à la vitesse du son.*

Commentaires Comme pour de nombreux phénomènes ondulatoire, on a deux grandeurs couplés, reliés à deux formes de "stockage" de l'énergie.

2.3 Intensité sonore

Mécanisme d'audition biologique Pour capter un son, il passe par le pavillon (adaptation d'impédance), le canal auditif et fait vibrer le tympan (puis le marteau et l'enclume jusqu'à l'oreille interne où un mécanisme complexe en forme d'escargot avec des un liquide et des poils fait la décomposition en fréquence) et produit un signal vers le cerveau.

Intensité sonore ✍ Sanz. On définit l'intensité sonore comme la puissance moyenne par unité de surface transportée par l'onde :

$$I = \langle \mathbf{\Pi} \cdot \mathbf{n} \rangle$$

où $\langle \cdots \rangle$ dénote une moyenne temporelle. Cette intensité varie énormément selon les sources utilisées : la différence d'intensité entre le bourdonnement d'un moustique et le décollage d'une fusée atteint 12 ordres de grandeurs ! Pour manipuler ces valeurs, on va définir le niveau sonore, ou intensité sonore en décibels, par

$$I_{\text{dB}} = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad \text{avec} \quad I_0 = 1 \times 10^{-12} \text{Wm}^{-2}$$

On définit l'intensité acoustique (W/m^2) et le niveau sonore, seuil d'audibilité, de douleur. L'intensité de référence 10^-12 est le seuil limite d'audition pour 1000 Hz. Le domaine de sensibilité de l'oreille (audibilité/douleur) est max à cette fréquence. On justifie l'échelle logarithmique par la grande plage d'ordre de grandeur d'intensité sonore et par le fait que pour le son (comme pour la lumière, loi de Fechner), la perception humaine de l'intensité du son est logarithmique. Si le dB augmente de 3, l'intensité double. Si le dB augmente de 30, l'intensité augmente de $2^{10} = 1024$. Si le dB double, l'intensité a été mise au carré. On projette un graphe avec des exemples, et la plage d'audition humain Attention pour les ODG toujours bien préciser à quelle distance on se place pour mesurer ces intensités !

Perception humaine La perception humaine correspond à la manière dont nous allons associer une sensation subjective (son fort ou faible, douleur...) à une quantité physique fixée : c'est le domaine de la psychoacoustique. Le but de cette partie va être de donner quelques ordres de grandeurs autour de la manière dont nous percevons les sons.

Tout d'abord, les fréquences accessibles à l'oreille humaine sont situées entre 20Hz et 20kHz (avec une valeur maximale qui diminue avec l'âge).

De plus, l'intensité à laquelle on perçoit les sons dépend fortement de la fréquence. La valeur choisie pour I_0 correspond environ au son le plus faible audible par l'homme, qui est vers 4kHz. Pour percevoir des sons à d'autres fréquences, il faut une intensité plus élevée que 0 dB. À l'opposé, le seuil de douleur est souvent fixé à 120dB, mais dépend lui aussi de la fréquence. Pour tenir compte de cet effet, on peut s'intéresser aux courbes isosoniques ou au dBA, qui sont des renormalisations de l'intensité selon la fréquence pour tenir compte de l'effet de l'onde sonore associée sur l'humain. Ce sont souvent ces valeurs qui sont choisies pour fixer des normes légales (ex : 102 dBA pour les salles de concert ou boîtes de nuit).

Bonus : Courbes isosonique Une ligne isosonique, ou courbe isosonique ou courbe d'isosonie, est le lieu des points de même sonie2 (définis par leur niveau de pression acoustique en dB SPL en fonction de la fréquence), c'est-à-dire provoquant la même sensation d'intensité sonore pour l'oreille humaine. L'unité de mesure du niveau de sonie est le phone : il correspond exactement au dB SPL pour une fréquence de 1 000 Hz.

Bonus : principe de fonctionnement d'un sonomètre, pondération dB A Il s'agit simplement d'un microphone suivi d'un convertisseur en dB (fonctionnement crête), avec éventuellement un intégrateur avant la conversion (mesure d'intensité moyenne). La mesure peut être pondérée par la norme dB A, qui s'appuie la réponse en fréquence de l'oreille humaine. Un mesure non pondérée est dite mesure en dB SPL (pour Sound Pressure Level).

Loi de masse en acoustique *La loi de masse ou loi des masses est une loi de l'isolation phonique. Les bruits provenant d'un milieu (émetteur) (exemple, rue animée) sont transmis jusqu'à un milieu récepteur (exemple, local) par voie solidienne (murs, sols, plafonds) ou par voie aérienne (interstices au niveau des portes et des fenêtres, ventilations). Toute paroi homogène et sans élasticité (ne vibrant pas), soumise à une onde sonore d'incidence normale à l'une des surfaces de cette paroi, génère un isolement régi par la loi de masse* $R = 20 \log \omega \sigma_M / 2 Z_{air}$. *La « loi de masse » signifie que dans le cas idéal d'une paroi infiniment grande (ou fortement amortie), R augmente de 6 dB par doublement de la fréquence et de 6 dB par doublement de la masse surfacique*

N sources incohérentes Alors les intensités s'ajoutent et le niveau sonore croît logarithmiquement. Ainsi quand on veut se réveiller le matin mettre deux réveils en même temps (si ils sont identiques) ne doublera pas l'intensité sonore mais l'augmentera de $\log 2 = 0.3$.

2.4 Retour sur les hypothèses

✍ Sanz + exos, Hprepa, capture Blancon.

Retour sur l'approximation acoustique (ordre 1) ✍ Sanz p952 Pour des intensités sonores "usuelles", on va vérifier si les hypothèses de l'approximation acoustique sont vérifiées. **ODG:** le déplacement détectable par l'oreille est de moins de la taille caractéristique d'un atome !

Retour sur la gravité Dans l'équation d'Euler, le terme de gravité $\rho_0 \vec{g}$ n'est pas négligeable, mais il change juste le profil de pression au repos p_0. Il faudrait comparer $\rho_1 \vec{g}$ avec $\rho_0 \partial_t v_1$ par exemple. cf. Sanz.

Retour sur la viscosité Estimation du Reynolds. On ne peut pas négliger en fait : cela va entraîner de l'absorption.

Supression et surtempérature La surpression entraîne une surtempérture (estimable avec la loi de Laplace). La crevette pistolet referme sa pince si vite qu'elle peut créer des surtempérature de 5000 K, 80 kPa , 218 dB.

Application : bain à ultrasons en chimie Le bain à ultrasons ou nettoyage à ultrasons ou sonicateur est une procédure accélérée de nettoyage de pièces ou de dissolution de produits par l'effet mécanique d'ondes ultrasonores de fréquence généralement comprises entre 20 kHz et 400 kHz. Le transducteur génère des phases successives de compression et de décompression. Ces phases sont des ondes ultrasonores, à une fréquence de 20 kHz à 170 kHz, qui génèrent dans ce liquide une grande quantité de bulles microscopiques par le phénomène de cavitation. L'implosion de ces bulles, pendant la phase de compression, provoque des turbulences au niveau de la pièce à nettoyer ou du produit à dissoudre. Ces turbulences détachent et éloignent les impuretés de la pièce ou accélèrent la dissolution.

Bonus : déplacement au niveau du tympan Déplacement de l'air au niveau du tympan. moins d'un atome !

3 Interfaces et résonance

3.1 Coefficients de passage

Condition sur la vitesse Continuité de la vitesse normale : pas de décollement. L'interface se déplace au passage de l'onde, mais dans l'approximation acoustique, le déplacement est faible devant la longueur d'onde : on le néglige. *Cette égalité ne devrait pas être écrite a priori en puisque l'interface se déplace. Nous savons cependant que ces déplacements sont extrêmement faibles devant la longueur d'onde, qui caractérise les variations des fonctions f et g. L'égalité précédente reste par conséquent convenable. Pour de la propagation dans une conduite de section variable, il faut utiliser la conservation du débit volumique, qui fait intervenir la pression. De plus, la vitesse tangentielle peut être différente.*

Condition sur la pression Considérons un piston de masse M, de section S et d'épaisseur négligeable, au niveau de l'interface (doc. 10). Soumis aux forces de surpression p_1 et p_2, son mouvement est décrit par l'équation $a(t)$ étant son accélération :

$$Ma(t) = S\left[p_1\left(x_0,t\right) - p_2\left(x_0,t\right)\right]$$

L'accélération du piston est celle du fluide au niveau de l'interface, elle reste finie. Lorsque la masse M du piston tend vers zéro, le produit $Ma(t)$ tend vers zéro et conduit à la continuité des surpressions :

$$p_1\left(x_0,t\right) = p_2\left(x_0,t\right), \text{ soit } Z_{c_1}\left[f_1\left(x_0,t\right) - g_1\left(x_0,t\right)\right] = Z_{c_2} f_2\left(x_0,t\right)$$

argument du piston : on imagine un piston/particule fluide de masse m à l'interface : il subit une force proportionelle à la différence de pression. Son accélération est celle du fluide au niveau de l'interface et est finie. En faisant $m \to 0$.

Coefficients de transmission/réflexion [calcul sur diapo, cf. capture de HPrepa] L'onde transmise est en phase $\tau_{12} \geq 0$. Pour l'onde réfléchie, cela dépend si $Z_1 > Z_2$ ou non, comme en optique.

Cas limites Impédance nulle (tuyau ouvert de diamètre $D \ll \lambda$ débouchant sur l'atomsphère), infinie (solide parfaitement rigide), adaptation d'impédance. Les impédances acoustiques terminales Z parfaites que nous pourrons aisément réaliser correspondent à : $Z = 0$: tuyau dont l'extrémité est ouverte à l'air libre (noeud de surpression $Z = +\infty$: tuyau dont l'extrémité est fermée (noeud de débit).

Ordres de grandeur et applications Considérons, par exemple, une interface liquide-gaz, Le liquide est nettement plus dense que le gaz et la vitesse du son y est supérieure (*cf.* g 1.3.). Nous obtiendrons alors $R = 1$ et $T < 1$. La transmission des ondes sonores entre un liquide et un gaz est fort peu efficace. Par exemple, un plongeur entendra distinctement le bruit d'une hélice de hors-bord tournant dans I'eau, mais beaucoup plus difficilement une personne placée sur la berge (doc, 11).

Nous pouvons étendre ce résultat à la réflexion quasi totale dans le cas d'une interface solide-gaz. Lorsque la géométrie du reflecteur solide s'y prête, nous obtenons alors un phénomène d'écho. La réflexion pourra être en revanche fortement atténuée par l'utilisation d'un solide très mou et très léger : liège, mousse. Plus généralement, l'obtention d'une bonne isolation phonique est obtenue par juxtaposition d'un matériau lourd et dur ; béton...., avec un matériau léger et mou : liège, polymères expansés (l'air est piégé au sein de ces matériaux).

Pour une interface liquide-gaz. Utilité du gel en échographie. Réflexion totale : en montagne.

Bonus : expériences avec diapason Nous pouvons réaliser quelques manipulations simples à l'aide d'un diapason métallique pour illustrer les conclusions que nous avons énoncées :

- Le diapason, excité par un choc initial, est tout d'abord maintenu en l'air. Il est délicat de percevoir le son qu'il émet même à proximité de la tête. La transmission des ondes sonores entre un solide et un gaz est peu efficace.
- Si le diapason est placé contre la tempe (ce que fait un musicien), le son devient parfaitement audible. La transmission est efficace dans le cas du contact solide, solide. La transmission des ondes sonore entre deux solides est efficace
- Si une plaque de polystyrène est placée entre le diapason et la tempe, le son redevient très faible. Un certain nombre de matériaux (feutre, polystyrène...) absorbent les sons.
- Si le diapason est placé dans un verre d'eau sur la tête, le son est aussi perceptible. La transmission des ondes acoustiques entre un solide et un liquide est efficace.

Vibreur sous cloche à vide
But : Problématique d'adaptation d'impédance.
Matériel : vibreur (qui fait vraiment mal aux narines), cloche, plateforme, micro avec adaptateur, oscillo + les câbles qui vont bien
Expérience : On démarre le vibreur à l'air libre, on acquiert avec le micro et on regarde l'intensité du signal sur l'oscillo. Puis on met micro + adaptateur micro + vibreur + câbles sous cloche, c'est galère, bien penser à prendre la plus grande cloche. On commence à faire le vide, bien redemander à Benoît comment on fait, c'est galère.On entend que le son audible depuis l'extérieur perd en intensité et le signal capté par le micro aussi. On dit alors que le son se propage moins bien parce que la pression diminue et que les molécules de gaz s'éloigne (on peut aussi calculer le libre parcours moyen).

Applications Isolation phonique : on alterne des matériaux lourds et durs (bétons) avec des matériaux mous et légers (mousse). Double vitrage **ODG:**

3.2 Modes propres d'une cavité

✍ Garing p98, Sanz p917, HPrepa p114 [en capture]

Principe d'un instrument à musique Pour les instruments à vent, ce sont les vibrations de la colonne d'air contenue dans le tube ou le tuyau qui constitue l'instrument qui produit le son. C'est ce que nous allons étudier dans ce complément, en modélisant l'instrument par un tuyau cylindrique de longueur L, dont les extrémités sont soit ouvertes soit fermées. Nous distinguerons les tuyaux dits symétriques pour lesquels les deux extrémités sont de même nature (toutes les deux ouvertes ou fermées) et les tuyaux dits mixtes pour lesquels elles sont de natures différentes (l'une ouverte et l'autre fermée).

Tuyaux symétriques, tuyaux mixtes Les instruments du type flûte sont des tuyaux symétriques (ouvert-ouvert), les instruments à anche (comme la clarinette) sont des tuyaux mixtes (fermé ouvert). Les tuyaux d'orgues sont ou bien symétriques ou bien mixtes. Dans tous les cas, pour jouer une note donnée, on ajuste la longueur du tube (par exemple en débouchant des trous sur une flûte ou en actionnant les pistons sur une trompette.

Conditions limites Les impédances acoustiques terminales Z parfaites que nous pourrons aisément réaliser correspondent à : $Z = 0$: tuyau dont l'extrémité est ouverte à l'air libre (noeud de surpression) $Z = +\infty$: tuyau dont l'extrémité est fermée (noeud de débit).

Illustration du fondamental et des harmoniques de la flûte (symétrique) et clarinette (mixte)
On montre la super vidéo :https://www.youtube.com/watch?v=N5Ch2NThFvY C'est important d'entendre des sons dans cette leçon ! La note la plus grave est plus grave pour la clarinette comparé à la flute. Toutes les harmoniques sont disponibles pour la flute. Seuls les harmoniques impairs sont présents pour la clarinette.

Tuyau symétrique Au niveau d'une extrémité ouverte, la pression est égale à la pression atmosphérique : la surpression est nulle. On notera l'analogie avec la corde fixée à ses deux extrémités*Le rayonnement est inefficace pour* $R \ll \lambda$. Faire des bons schémas pour illustrer graphiquement les conditions. Surpression et vitesse ne sont plus en phase car l'onde n'est pas plane progressive. L'onde est stationnaire et donc p_1 et v_1 sont en quadrature. Schématiquement, $p_1 = e^{i\omega t}(e^{ikx} + e^{i-kx}) \propto \cos(kx)$ et $v_1 = Z_c e^{i\omega t}(e^{ikx} - e^{i-kx}) \propto \sin(kx)$

Tuyau mixte Les conditions aux limites imposent maintenant : $v_1(0,t) = 0$ et $p_1(L,t) = 0$.

Bonus : mécanisme de production du son Le musicien qui souffle dans son instrument provoque des vibrations à l'une des extrémités du tube de résonance de son instrument. Diverses techniques permettent d'obtenir au bout du tube un vibreur qui va entretenir les oscillations propres de la colonne gazeuse contenue dans le corps de l'instrument.

- Pour des instruments à embouchure de flûte, l'écoulement turbulent de l'air de part et d'autre du biseau provoque le décollement périodique des tourbillons d'air (estimer Re ?), produisant des vibrations excitatrices filtrées par la cavité résonante (tube de l'instrument). L'ouverture au niveau du biseau étant assez importante, cette extrémité du tube de l'instrument se comporte approximativement comme une extrémité libre.
- D'autres instruments possèdent une anche (hautbois, clarinette, ...) que le souffle de l'instrumentiste fait vibrer. Dans d'autres encore (clairon, cor, ...), ce sont les lèvres du musicien qui sont mises en vibration. L'extrémité excitatrice est alors assimilée à une extrémité fermée. L'autre extrémité des instruments à vent est généralement ouverte, nous l'assimilerons donc à une extrémité libre.

Dans ces conditions, le son émis par les instruments à embouchure de flûte comporte les fréquences [expression] alors qu'un instrument à anche ne produira que des harmoniques impairs [expression].

Différence de timbre Le timbre, c'est-à-dire la répartition et l'amplitude des harmoniques, des deux types d'instruments est très différent : les tuyaux symétriques émettent toutes les harmoniques du fondamental alors que les tuyaux mixtes n'émettent que les harmoniques impairs. En règle générale, quand on souffle dans un instrument, on excite surtout le mode fondamental mais si on souffle plus fort, on peut exciter préférentiellement des harmoniques supérieurs. C'est le cas de la trompette baroque ou du clairon, instruments privés de pistons donc pour lesquels on ne peut jouer que les harmoniques naturelles d'une note fondamentale. *Ils dépendent aussi de nombreux autres paramètres, que notre étude élémentaire (ondes planes, section constante, modélisation des extrémités, ...) est loin d'englober. Constatons que la note fondamentale est d'autant plus grave (fréquence faible) que la longueur L est importante.*

Dépendance en température De plus, la dépendance de c en la température fait que les musiciens doivent accorder leurs instruments en fonction des conditions de la salle **ODG:** 35 degrés C de différence donne une demi-ton ($2^{1/12}$) de différence. *Pourquoi les vents dans un orchestre jouent de plus en plus haut et les cords de plus en plus bas au cours du concert ? La longueur d'onde étant fixée par les noeuds et les ventres (trous / doigtésdu musicien), la fréquence augmente comme $\sqrt{T}$, donc augmente au fur et à mesure que l'air dans l'instrument se réchauffe. À l'inverse, les instruments à cordes jouent de plus en plus grave car celles-ci se détendent et que la célérité varie en $1/\sqrt{T_0}$ (ici T_0 est la tension de la corde).*

Application : caisse de résonance d'un diapason ✍ Hprepa p115 Une caisse de résonance est de type fermé-ouvert : le fondamental est tel que $L = \lambda/4$.

Tube de Kundt
Montrer l'onde stationnaire

Atténuation des ondes sonores

✍ Garing.
Les causes de perte sont : (i) viscosité (cisaillement et volume) (ii) dilution géométrique/diffraction (iii) retard de réponse/relaxation thermique (iv) diffusion thermique. Avec les lois d'échelles de la diffusion, la distance caract. d'atténuation δ varie en $\delta \sim 1/\omega^2$

Dans le domaine audible, les atténuations sont sans conséquence. les pertes augmentent en $1/\omega^2$ (mais laissent invariant la vitesse de phase à l'ordre 1) et sont conséquentes pour les sous-marins et l'échographie.

En été, la journée je ne n'entend pas l'autoroute à 1 km de chez moi mais quand je me mets dans mon jardin en fin de journée, je commence à les entendre, pourquoi ? Effet de la température : quand il fait chaud, la viscosité et la température augmentent : cela atténue plus !
Dilution géométrique/diffraction Les causes de pertes augmentent à haute fréquence. Diminuer la fréquence n'est pas idéal car on est plus sensible à la diffraction. Il y a souvent un compromis atténuation-directivité.

Première et seconde viscosité ✍ Brebec p127 un terme en $\partial_t \Delta p$ apparaît. On peut calculer la relation de dispersion. L'atténuation se fait sur une distance inversement proportionnelle à ω^2. Un tonnerre paraît plus grave quand on l'entend de loin.

Retard de réponse/relaxation thermique ✍ Garing, Brebec (HPrepa) p122.

Conduction thermique ✍ Choimet (Bréal thermodynamique) p120. Parmi les trois équations de base de l'acoustique *i.e.* l'équation d'Euler, l'équation de conservation de la masse et la loi de Laplace, il faut changer la loi de Laplace pour tenir compte des échanges de chaleurs (transformations non adiabatiques, irréversibles). On la remplace par l'équation d'état du gaz supposé parfait : $p_0 + p_1 = R/M(\rho_0 + \rho_1)(T_0 + T_1)$ et on identifie les ordres pour avoir p_1 en fonction de ρ_1, T_1 où T_1 est une nouvelle variable. Pour fermer le système, il faut utiliser l'équation de conservation de l'énergie qui donne la dynamique de T. Equation due à Pippard, avec $\Box_s$ le d'Alembertien pour des transformations isentropiques et $\Box_T$ pour le d'Alembertien isotherme : $\partial_t(\Box_s \rho_1) = D_{th}\Delta(\Box_T \rho_1)$ la propagation est imbriquée avec la diffusion. Aux limites $D \to \infty$ et $D \to 0$ on retrouve les équations de propagation isothermes et isentropiques. L'équation est linéaire, ce qui justifie la recherche d'une équation de dispersion. La partie imaginaire de k donne une

longueur d'atténuation de 87m à 40kHz. Dans le domaine de l'audible, la diffusion a peu d'effet mais est plus important (quoique faible) dans le domaine des ultrasons.

Conclusion

Ouverture :

- Effet de la viscosité (effet de la seconde viscosit, trouvé une ref)
- Ondes sonores dans la mer
- Echographie (ou dernière partie)

Manip possible en fonction du temps

Mise en évidence de la propagation du son :
On place deux micro à une distance L, on clappe des mains et on observe le retard entre les deux signaux à l'oscilloscope. On connait L, on connait donc température de la pièce, dans l'air.

Vibreur sous cloche à vide
But : Les ondes acoustiques ont besoin d'un milieu matériel pour se propager, contrairement aux ondes électromagnétiques. Problématique d'adaptation d'impédance.
Matériel : vibreur (qui fait vraiment mal aux narines), cloche, plateforme, micro avec adaptateur, oscillo + les câbles qui vont bien
Expérience : On démarre le vibreur à l'air libre, on acquiert avec le micro et on regarde l'intensité du signal sur l'oscillo. Puis on met micro + adaptateur micro + vibreur + câbles sous cloche, c'est galère, bien penser à prendre la plus grande cloche. On commence à faire le vide, bien redemander à Benoît comment on fait, c'est galère.On entend que le son audible depuis l'extérieur perd en intensité et le signal capté par le micro aussi. On dit alors que le son se propage moins bien parce que la pression diminue et que les molécules de gaz s'éloigne (on peut aussi calculer le libre parcours moyen). Il faut bien préciser que la différence entre la diminution du son vu du micro et vu du public vient d'un point qui sera mis en lumière plus tard (réflexion/transmission entre l'air à basse pression et le verre)

Détermination de la vitesse du son dans l'air
But : utiliser la relation de dispersion des ondes acoustiques dans l'air $c = \lambda\nu$.
Manip : On utilise le banc Doppler (un émetteur piézo mobile et un récepteur piézo fixe sur un banc gradué) de la collection, un GBF et oscillo+ câbles de l'expérience illustrative. On envoie un signal de quelques V et 40 000 Hz (fréquence de résonnance des piézos) sur l'émetteur. Sur l'oscillo on observe le signal qu'on envoie sur l'émetteur et le signal que l'on reçoit du récepteur. Après avoir expliqué ça au jury, on met l'émetteur loin du récepteur en ayant les signaux en phase sur l'oscillo et on note cette position. On rapproche ensuite l'émetteur en surveillant sur l'oscillo le nombre de longueurs d'onde qu'on balaye (20 c'est bien). On note alors le Δx correspondant à ces 20λ, on en déduit λ.

Compléments/Questions

Compléments

- Echelle biologique : Pour capter un son, il passe par le pavillon (adaptation d'impédance), le canal auditif et fait vibrer le tympan (puis le marteau et l'enclume jusqu'à l'oreille interne où un mécanisme complexe en forme d'escargot avec des un liquide et des poils fait la décomposition en fréquence) et produit un signal vers le cerveau. Pour le son (comme pour la lumière, loi de Fechner), notre corps fonctionne en échelle logarithmique, on a donc créé une échelle adaptée,le décibel. voir Cap prépa PSI,Renvoizé

- L'atténuation du son a deux origines différentes. Le premier effet est un effet géométrique lié à la dilution de l'énergie dans l'espace. Les sources sonores émettent souvent des ondes sphériques (cf. un avion). Pour que l'énergie rayonnée se conserve sur une sphère de rayon r, le vecteur de Poynting doit-être en 1/r2, et les amplitudes de la surpression et de la survitesse en 1/r. On note que pour un bruit de type « coup de bélier »dans une canalisation oupour une route très fréquentée, la géométrie est cylindrique (en 1/r, p et v en 1/ p r. Une telle atténuation ne peutêtre rendue avec une solution en ondes planes. Le deuxième effet est la dissipation microscopique, qui a elle-même troisorigines : la viscosité, la diffusion thermique et le retard microscopique de compression. On peut établir un parallèleentre l'absorption des ondes sonores et la loi de Beer-Lambert en électromagnétisme. (Voir Garing + fiche pour détails)
- Comme pour toute onde linéaire, la célérité cs se met sous la forme de la racine d'une raideur (ici, l'inverse d'unecompressibilité) sur une inertie (la densité du fluide). Il est conseillé de faire apparaître de manière très claire le lien entre célérité des ondes acoustiques et rigidité du milieu.
- Echographie.
- Mesure du débit sanguin par effet Doppler.
- Résonateur de Helmholtz : La résonance de Helmholtz est un phénomène de résonance de l'air dans une cavité. Ex : principe de l'ocarina, son créé lorsque l'on souffle dans le haut d'une bouteille vide. Ce n'est pas lié aux fréquences propres acoustiques de la cavité (plus hautes), mais aux oscillations (type masse-ressort, dues à la dilatation-compression) de la colonne d'air dans le col.
- Sonoluminescence : La sonoluminescence est le phénomène par lequel des photons sont émis par des bulles de gaz dont on fait varier le diamètre grâce à des ultrasons.
- Emetteur à ultrasons : Par piézoélectricité, magnétostriction ou électrostriction, on applique une tension/champ magnétique/champ électrique variable ce qui déforme mécaniquement un matériau.

Questions

- Condition d'application de la loi de Laplace ? Gaz parfait, transformation adiabatique réversible.
- Pourquoi négliger la pesanteur à l'ordre 1 ? Terme source ? La gravité va modifier l'ordre 0 : équilibre hydrostatique. Milieu stratifié. La célérité va dépendre de la hauteur. On s'est placé en milieu homogène pour avoir une célérité indépendante du point.
- Exemples de propagation non linéaire : onde de choc, tsunami, soliton.
- Distance sur lesquelles les particules de fluide sont déplacées ? Reliées à l'amplitude de l'onde en vitesse.
- Comment définir l'impédance sans analogie avec l'électrocinétique ?
- Vous ne l'avez précisé, quelle est la moyenne utilisée pour définir l'intensité sonore ? C'est une moyenne temporelle basée, comme le relaxation de l'oreille. Et cette moyenne est toujours pertinente ?Nan pas pour les basses fréquences.
- Distinction ondes sonores, ondes acoustiques ? Ondes sonores que dans l'audible.
- Quel est le principe de fonctionnement d'un hautparleur ? Les ondes sont créées par la vibration d'une membrane solidaire d'un conducteur dans un champ magnétique variable (induction)
- Pourquoi les vents dans un orchestre jouent de plus en plus haut au cours du concert ? La longueur d'onde étant fixée par les noeuds et les ventres (trous / doigtés du musicien), la fréquence augmente comme $\sqrt{T}$, donc augmente au fur et à mesure que l'air dans l'instrument se réchauffe. À l'inverse, les instruments à cordes jouent de plus en plus grave car celles-ci se détendent et que la célérité varie en $1/\sqrt{T}$ (ici T est la tension de la corde).
- Principe de fonctionnement d'un sonomètre ? Il s'agit simplement d'un microphone suivi d'un convertisseur en dB (fonctionnement crête), avec éventuellement un intégrateur avant la conversion (mesure d'intensité moyenne). La mesure peut être pondérée par la norme dB A, qui s'appuie la réponse en fréquence de l'oreille humaine. Un mesure non pondérée est dite mesure en dB SPL (pour Sound Pressure Level).
- Quelle est l'approximation acoustique dans un solide ? C'est l'élasticité linéaire.
- A quoi sert l'intensité sonore ?
- Déplacement de l'air au niveau du tympan. moins d'un atome ! !

- Forme de l'onde émise par le clap ?
- Comment démontrer la continuité de la pression à une interface ? cf. plan.
- Que montre la cloche à vide ? Plutot l'adaptation d'impédance.
- Pourquoi en acoustique le fluide est supposé compressible alors qu'en mécanique des fluides on le suppose généralement incompressible. Lien avec le nombre de Mach. Connais-tu le cône de Mach ? Phénomène identique en électromagnétisme ? Effet Cherenkov.
- Pouvez-vous commenter l'évolution de la vitesse de propagation des ondes acoustiques entre un gaz, un liquide et un fluide en terme de raideur et d'inertie du milieu de propagation ?
- De combien de décibels décroit le niveau sonore lorsque la distance à la source double (en supposant la propagation d'une onde sphérique) ?
- Pouvez-vous commenter les analogies et différences entre un cône de Mach pour une onde sonore et un sillage de bateau ou de canard ? Quel analogue au cône de Mach retrouve-t-on en électromagnétisme ?
- Pourquoi il faut que la moyenne temporelle des perturbations soit nulle ? Conservation globale de la masse.
- Qu'est-ce qu'une onde acoustique ? Ordre de grandeur de la surpression et de la vitesse de déplacement des couches V1
- Limites de l'approximation acoustique ? Grande fréquence/amplitudes.
- Que se passe-il si on a un écoulement permanent dans le fluide ? Le son est porté le vent.
- Pourquoi physiquement le son se propage plus vite dans un liquide et encore plus vite dans un solide ?
- Physiquement pourquoi l'hypothèse adiabatique est plus probable ? Si la transformation n'est pas isotherme, il y a changement de température, dans quel sens et pourquoi ?
- S'il y a échauffement du fluide à cause de la viscosité, pourquoi avoir pris l'équation d'Euler ? Est-ce que cela influe sur la masse volumique, si oui comment ?
- En été, la journée je ne n'entend pas l'autoroute à 1 km de chez moi mais quand je me mets dans mon jardin en fin de journée, je commence à les entendre, pourquoi ? Effet de la température : quand il fait chaud, la viscosité et la température augmentent : cela atténue plus !
- Des ondes longitudinales c'est quoi ? En quoi c'est différent des ondes dont on a l'habitude ?
- L'impédance c'est quoi ?
- Le terme d'énergie potentielle vient d'où physiquement ?
- Quel est le principe de fonctionnement d'un haut parleur ? Les ondes sont créées par la vibration d'une membrane solidaire d'un conducteur dans un champ magnétique variable (induction)
- Qui a fait l'hypothèse d'adiabadicité et que se passe-t-il si on ne la fait pas ? C'est Laplace qui l'a proposée l'hypothèse de propagation isotherme avait été faite par Newton, ce qui change la valeur de c d'un facteur $\sqrt{\gamma}$
- Quel principe physique est traduit par une onde sphérique en $1/r$? La conservation de l'énergie
- Comment montre-t-on la conservation de l'énergie ? Bilan sur un volume de contrôle + Green-Ostrogradsky
- Pourquoi les vents dans un orchestre jouent de plus en plus haut au cours du concert ? La longueur d'onde étant fixée par les noeuds et les ventres (trous / doigtésdu musicien), la fréquence augmente comme $\sqrt{T}$, donc augmente au fur et à mesure que l'air dans l'instrument se réchauffe. À l'inverse, les instruments à cordes jouent de plus en plus grave car celles-ci se détendent et que la célérité varie en $1/\sqrt{T_0}$ (ici T_0 est la tension de la corde).
- Principe de fonctionnement d'un sonomètre ? Il s'agit simplement d'un microphone suivi d'un convertisseur en dB (fonctionnement crête), avec éventuellement un intégrateur avant la conversion (mesure d'intensité moyenne). La me- sure peut être pondérée par la norme dB A, qui s'appuie la réponse en fréquence de l'oreille humaine. Un mesure non pondérée est dite mesure en dB SPL (pour Sound Pressure Level).
- À combien de chiffres significatifs connaît-on le coefficient thermodynamique γ ? Le coefficient γ a ceci de particulier qu'il vaut $7/5 = 1.4$ exactement (et non $\gamma \sim 1.40...$). C'est une valeur théorique qui vient de la physique statistique (gaz diatomique à température ambiante).

- Comment expliquer l'origine du son d'une guitare ? La vibration des cordes excite la vibration de l'air environnant. La couche d'air au-dessus de la rosace excite la caisse qui joue le rôle de résonateur. La puissance sonore est évacué par rayonnement : c'est le son que l'on entend.
- Vous avez montré que c s dépendait de M et de T. Connaissez-vous une illustration de ces deux dépendances dans la vie quotidienne ? L'effet Donald Duck en se mettant de l'hélium dans la bouche pour M et la réfraction par effet mirage au dessus d'un lac gelé pour T.
- Connaissez-vous des exemples de la vie quotidienne pour chacun des aspects ondulatoires du son ? Par exemple : cf. ci-dessus pour la refraction, la focalisation dans la « whispering gallery »(e.g. cathédrale St Paul) pour la reflexion, les casques anti-bruit d'avion pour les interférences, la répartition du don par une porte entrouverte pour la diffraction.
- Comment marche un mur antibruit ? Par une association des différentes propriétés ondulatoires du son. Une partie de l'onde est réfléchie. Une autre partie est concentrée dans les structures du mur pour être atténuée. Ces structures associent réfraction et absorption pour se comporter comme des résonateurs de Helmholtz. Une partie de l'énergie est diffractée. Néanmoins, la taille, la forme et la composition du mur sont optimisées pour minimiser ces effets.
- Que se passe-t-il si le fluide a une petite vitesse v0 ? cs ? L'onde est advectée par le fluide à la vitesse v0 .
- Qu'est ce qu'un gaz parfait ? Un gaz constitué de particules élémentaires ponctuelles, indiscer- nables et sans interaction.
- Pourquoi rot(v)=0 est important ici ?
- Vous avez une idée de l'ordre de grandeur des variations de la masse volumique de l'air avec l'altitude ?
- On a une évolution isentropique et non pas isotherme, donc la température du fluide change au passage de l'onde. Comment change-t-elle ? Vous avez une idée de l'ordre de grandeur ? D'une façon de calculer ça ?
- Existe-t-il d'autres applications que les cuves à ultrasons en chimie aux surpressions et aux sur-températures locales ?
- Pouvez-vous évaluer les variations locales de la température pour une intensité de pression donnée ?
- Savez-vous si la célérité des ondes sonores change avec l'altitude ? Évolue-t-elle beaucoup, peu ? Oui à cause de la variation de température, donner la longueur caractéristique de l'atmosphère isotherme.
- Vous avez parlé d'impédance acoustique... Est-ce que vous savez l'application que cette notion peut avoir, par exemple dans le cas des tuyaux d'échappement des voitures ? Comment ça se passe dans ce cas ?
- Tout au long de votre leçon, vous avez fait une analogie entre les ondes acoustiques et les ondes électromagnétiques. Quelles sont les limites de cette analogie ?
- Est-ce que ça change quelque chose que la propagation soit longitudinale ici plutôt que transverse ?
- Justement, puisque vous parlez de guidage d'ondes : peut-on guider des ondes acoustiques ?
- Vous avez une idée des applications de la chose ?
- Maintenant, j'aimerais revenir sur votre expérience. Vous avez dit qu'en mode Lissajout, vous étiez plus précis qu'avec le mode de visualisation normal pour mesurer le défilement des longueurs d'onde. Pouvez-vous vous expliquer ? Donc vous dîtes qu'il n'y a pas vraiment une différence de précision en fait, mais que c'est plus une question de commodité et de pédagogie ?
- Comment un émetteur à ultrasons fonctionne, mécaniquement parlant ? Par piézoélectricité, magnétostriction ou électrostriction, on applique une tension/champ magnétique/champ électrique variable ce qui déforme mécaniquement un matériau.
- Quelle grandeur physique se déplace dans la propagation d'une onde sonore ? D'où vient le son produit par un instrument de musique ? Toutes les ondes sonores sont-elles longitudinales ? A quoi correspond physiquement l'impédance acoustique d'un milieu ? Est-ce que les ondes acoustiques se dissipent de la même façon que les ondes lumineuses ? Pourquoi ?
- Est-ce que vous connaissez le phénomène de sonoluminescence ?

- Expliquer physiquement l'impédance acoustique. Y-a-t'il des problèmes de cohérence avec une source type haut parleur ? Quelle est la force de viscosité dans le cas général ? Hypothèse sur le référentiel d'étude ? Influence de la gravité toujours négligeable ?
- La vitesse de l'onde = vitesse quadratique moyenne dans un GP. Coïncidence ? Par analyse dimensionnelle, on a pas beaucoup le choix pour construire des grandeurs homogènes à des vitesses, on a la liberté des facteurs γ.
- Vous avez dit $\vec{\Pi} = (P_0 + p)\vec{v}$ puis vous avez enlevé le terme en P_0 . Pourquoi ?
- A quoi ça vous a servi de définir l'impédance acoustique ? A quoi ça sert cette grandeur ? A comprendre réflexion et transmission à une interface
- Si on essaie de mettre un peu de physique là-dedans, pourquoi est-ce que la vitesse du son dans un liquide est plus élevée que dans un gaz ? Libre parcours moyen très différent
- Quelle interprétation microscopique peut- on donner à cette onde ? Collisions
- Comment se passent les interactions ?
- C'est quoi les interactions qui ont lieu dans le fluide, pendant que l'onde passe ?
- Qu'est-ce qui se passe si je diminue la pression dans un gaz (par exemple dans cette salle de classe) ? Comment varient les interactions ? Et donc comment varie la vitesse du son ?
- Quelle est la chose principale à retenir de cette leçon ?
- Est-ce que la contrainte est uniquement normale ? Et quand on considère l'aspect microscopique de l'onde, est-ce que c'est toujours normal ? Cisaillement !
- Il y a aussi une leçon sur les fonctions d'état caractéristiques en thermodynamique. Si on prend la bonne fonction d'état caractéristique, quel est le lien entre χ_s et la fonction d'état caractéristique ?
- Est-ce que c'est une dérivée d'ordre 1 de la fonction caractéristique ? D'ordre 2 ? Dérivée d'ordre 2
- Est-ce qu'il n'y a vraiment pas de propagation d'ondes transverses possible ? Vous avez montré que les ondes planes sont transverses, mais est-ce qu'il y a d'autres cas possibles ?
- Dans le cas où il y a un milieu stratifié (la densité dépend de la coordonnée z), par exemple dans la mer, alors est-ce qu'il est possible d'avoir des ondes transverses ?
- Par exemple dans le cas des ondes internes qui se développent dans un milieu stratifié ? On peut avoir des ondes transverses oui. Elles ont parfois des vitesses de phase et des vitesses de groupe non colinéaires
- Par rapport à l'équation d'Euler, quel est le terme qu'on rajouterait dans le cas d'un fluide visqueux ?
- L'équation avec $\eta\Delta v$ n'est valable que pour un fluide incompressible. Qu'est-ce qu'il faudrait rajouter si le fluide n'était pas incompressible ? Un terme en div v .
- Comment on fait pour générer des ondes sonores ?
- Comment ça marche un haut-parleur ? D'un point de vue mécanique ?
- Ca ressemble à un rayonnement dipolaire, non ? Donc quelle est la dépendance de la puissance sonore émise en fonction de la fréquence ?
- Quelle est la dépendance en fréquence dans le cas d'un dipôle ? En ω^4.
- Quelle est l'expression de l'analogue des lois de Descartes (de l'optique) en acoustique ?
- C'est quoi l'analogue de l'indice optique en acoustique ? La vitesse du son dans le milieu.
- Vous connaissez une application de ces lois de Descartes en acoustique ou bien un effet dans le cas d'un milieu qui varie continûment ? Mirages acoustiques (dans d'une atmosphère avec le bon profil de température). Par exemple quand on envoie une onde acoustique dans le ciel, elle peut être renvoyée vers le sol par cet effet de mirage. C'est un cas où la vitesse du son varie continûment avec z.
- Si un élève vous demande comment on obtient l'énergie potentielle des ondes acoustiques, vous répondez quoi ? Vous l'avez seulement admis ici. Travail des forces de pression
- Est-ce que deux sources acoustiques sont cohérentes ? Non

- Est-ce qu'on a les mêmes effets de cohérence qu'en optique ?
- Est-ce que deux scooters sont cohérents ? Autres questions :
- Comment voir les raies d'émission d'ondes acoustiques ? Réseau.

Passage

Plan

Intro. Son perçu quotidiennement. Manip : buzzer dans une cloche à vide → le son a besoin d'un support pour se propager. Mais en fait on montre juste la différence d'impédance.

Cadre : étude du son que dans les fluides et pas dans les solides.

I/Mécanismes de propagation. 1) Mise en évidence. Equation des ondes acoustiques (poly de Jeremy). Ecrire les développements de p, ρ et v à l'ordre 1. H1 : $p_1 \ll p_O$ et $\rho_1 \ll \rho_0$ et $v1 \ll c$. H2 : fluide parfait. H3 : évolution adiabatique. H4 : négliger la pesanteur à l'ordre 1 (ie $\rho_1 g$ négligé). Introduire $\chi_s = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_S$. Equation de d'Alembert avec $c = \frac{1}{\sqrt{\rho_O \chi_S}}$.

Manip pour vérifier la vitesse du son dans un gap parfait : émetteur/récepteur avec un signal sinusoidal. Compte distance pour 20 longueurs d'ondes.

Solution. Commenter caractère longitudinal des ondes sonores vs. caractère transverse des ondes EM ou des ondes de surface.

II) Aspects énergétiques. 1) Conservation de l'énergie (hypothèse). Equation de conservation, calcul de la densité de flux d'énergie $\vec{\pi}$ et de l'énergie volumique. 2) Intensité. Valeur moyenne de la norme de $\vec{\pi}$. **ODG:** valeurs min audible et seuil de douleur pour l'oreille humaine. Notion de décibel. Echelle d'ordre de grandeur projetée. 3) retour sur les hypothèses. Estimation de pression, vitesse, densité min/max pour les extrêmes audibles. Vérifier qu'elles sont négligeables. NB : si $p_{max} \sim 30Pa$ on a mal alors qu'on peut aller sous l'eau. Il faut distinguer alternatif vs continu.

III) Réflexion et transmission 1) Impédance, définition. Définition. Analogie avec le câble coaxial en électrocinétique sur diapo pour trouver l'impédance. 2) Conditions aux limites. Continuité de la vitesse (argument : pas de décollement de matière) et la pression (pas de choc, avec le PFD faire tendre la masse vers 0 à accélération supposée finie). 3. Coefficient de réflexion/transmission en incidence normale. Adapatation d'impédance. Application : utilité du gel en échographie. Réflexion totale : en montagne.

Commentaires

Si on veut utiliser l'analogie avec le câble coaxial, mettre dans les prérequis "propagation dans un câble coaxial".

Pertinence de l'analogie pression/vitesse avec tension/intensité (imaginer un barrage, la vitesse c'est le débit).

On aurait pu faire l'analogie aussi avec le câble coaxial pour le vecteur de Poynting/de propagation de l'énergie.