# LP25 - Ondes acoustiques

Cléments (Colléaux + de la Salle)

9 juin 2020

## Niveau : L2

## Bibliographie

✍ J'intègre PC/PC*, **Sanz** → chap 26

## Prérequis

➢ ElectroMagnétisme

➢ Mécanique des Fluides

➢ Lois de conservation

➢ Ondes

## Expériences

— Exp du réveil ou tout autre truc qui fait du bruit, on le met sous vide et hop plus rien -> il faut donc de l'air, de la matière pour que le son se propage,...

— Tube de Kunt et influence de la température sur la vitesse du son

— Simple mesure de la vitesse du son dans l'air

— Effet Doppler

## Table des matières

# 1 Mécanismes de propagation

## 1.1 Mise en évidence du phénomène

**Manip' : Vibreur sous cloche**

Attention souvent on dit fout juste le buzzer sous la cloche et on dit qu'on n'entend plus rien sous vide donc le son ne se propage pas... C'est pas tout à fait vrai car on augmente aussi la réflexion sur le verre (cf. fin de leçon) donc pour faire l'expérience il faut bien foutre un micro DANS la cloche et observer à l'oscillo.
`https://youtu.be/Xy6fIDGPerc`

— Expérience : On place un truc qui fait du bruit sous cloche et en faisant le vide on entend de moins en moins de bruit.

— Donc propagation dans un milieu matériel (**Onde mécanique** $\neq$ ondes électromagnétiques)

— Donc on définit les variables qui nous intéressent $(p_1, \rho_1, \vec{v_1})$ telles que :

$$\begin{cases} p(\vec{r},t) = p_0 + p_1(\vec{r},t) \\ \rho(\vec{r},t) = \rho_0 + \rho_1(\vec{r},t) \\ \vec{v}(\vec{r},t) = \vec{v_1}(\vec{r},t) \end{cases}$$

## 1.2 Hypothèses et mise en équation

**Approximation acoustique**

1. Ces petites variables sont négligeables devant les grandeurs à l'équilibre et elles sont de moyenne temporelle nulle (pour la vitesse, $||\vec{v}|| \ll c$)
2. Le fluide est considéré comme parfait (sans viscosité et donc évolution isentropique) et incompressible
3. Pesanteur négligeable

**Vérification des hypothèses**

1. Voir après les calculs faits que les variations sont effectivement petites
2. Pour l'évolution adiabatique :
   $\tau = \lambda^2/D$ : temps qu'il faut à la chaleur pour être transmise sur une longueur d'onde $\lambda$ (par diffusion)
   $T = 1/f = \lambda/c$ : temps qu'il faut à l'onde pour voyager sur $\lambda$
   $$\frac{\tau}{T} = \frac{c^2/(f^2 D)}{1/f} = \frac{c^2}{fD}$$
   Pour l'air : $D = 10^{-5}$ m$^2 \cdot$ s$^{-1}$, $c = 340$ m $\cdot$ s$^{-1}$ et au pire $f = 20$ kHz donc $\tau/T = 6 \cdot 10^5$
   Pour l'incompressibilité : il faut $||\vec{v}|| \ll c$ (nombre de Mach inférieur à 0.3)

Pour négliger la viscosité : comme l'évolution est adiabatique il n'y a pas de dissipation

3. Pour négliger la pesanteur, on pourra vérifier qu'on a bien $||\rho_0 \frac{\partial \vec{v_1}}{\partial t}|| \gg ||\rho_1 \vec{g}||$.

Première équation : équation d'Euler d'un fluide parfait en négligeant la pesanteur

$$\rho\left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}\cdot \vec{\text{grad}})\ \vec{v}\right) = -\vec{\text{grad}}\ p$$

Et donc au premier ordre,

$$\boxed{\rho_0 \frac{\partial \vec{v_1}}{\partial t} = -\vec{\text{grad}}\ p_1}$$

Puis comme l'évolution est isentropique, on peut définir le coefficient de compresibilité isentrope $\chi_S = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_S = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_S \sim \frac{1}{\rho_0}\frac{\rho_1}{p_0}$ de sorte que l'on ait

$$\boxed{\rho_1 = \rho_0 \chi_S p_1}$$

Enfin, par conservation de la masse,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}\ (\rho \vec{v}) = 0$$

Donc en développant au premier ordre,

$$\boxed{\frac{\partial \rho_1}{\partial t} = -\rho_0\ \text{div}\ \vec{v_1}}$$

Ensuite on combine les équations ainsi : $\frac{\partial}{\partial t}$ (1.2) − (1.2)

$$\frac{\partial^2 \rho_1}{\partial t^2} = \text{div}\ \vec{\text{grad}}\ p_1 = \Delta p_1 = \rho_0 \chi_S \frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2}$$

On obtient alors une équation dite de d'Alembert

$$\Delta p_1 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} = 0, \qquad \text{avec} \quad c = \frac{1}{\sqrt{\rho_0 \chi_S}}$$

**Remarques**

1. $\vec{v_1}$ et $\rho_1$ vérifient la même équation
2. Pour un gaz parfait lors d'une transformation isentrope :

$$\begin{aligned} pV^\gamma = \text{cste} &\implies V^\gamma \text{d}p + \gamma p V^{\gamma-1}\text{d}V = 0 \\ &\implies \chi_S = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_S = \frac{1}{\gamma p_0} \\ p = \frac{\rho R T}{M} &\implies \chi_S = \frac{M}{\gamma \rho_0 R T} \\ &\implies c = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}} \end{aligned}$$

Donc avec $\gamma = 1.4$, $R = 8.314\ \text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$, $T = 20\ ^\circ\text{C}$, $M = 29\cdot 10^{-3}\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ on a $c = 343\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (et pour $T = 25\ ^\circ\text{C}$, on a $c = 346\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

3. Dans des solides on prend $\chi_S \sim 1/Y$ donc $c = \sqrt{\frac{Y}{\rho_0}}$ avec $Y = 20\cdot 10^9$, $\rho_0 =$

$2 \cdot 10^3$ kg $\cdot$ m$^{-3}$ dans le béton $\rightarrow c = 3100$ m $\cdot$ s$^{-1}$

4. Dans l'eau, $c = 1500$ m $\cdot$ s$^{-1}$

## 1.3 Solutions de l'équation de d'Alembert

Calcul déjà fait en EM :

| | |
|---|---|
| **Ondes planes** | $p_1(x,t) = f(t - x/c) + g(t + x/c)$ |
| | $\vec{v_1}(x,t) = 1/(\rho_0 c)\,(f(t - x/c) - g(t + x/c))\,\vec{e_x}$ |
| **Ondes sphériques** | $p_1(r,t) = 1/r\ f(t - r/c)$ |
| | $\vec{v_1}(r,t) = \left(-1/(\rho_0 r^2)\ f(t - r/c) - 1/(\rho_0 r c)\ f'(t - r/c)\right)\vec{e_r}$ |

**Remarques**

— Ondes longitudinales

— Pas de dispersion (d'Alembert en $(\omega, \vec{k})$ donne la relation linéaire $\omega = ck$)

> *$p$ et $\vec{v}$, vérifient l'équation de d'Alembert tout comme les champs $\vec{E}$ et $\vec{H}$ $\longrightarrow$ on peut définir un équivalent $\vec{\Pi}_{acous}$ de $\vec{\Pi}_{EM} = \vec{E} \times \vec{H}$ ? **OU** onde propagative donc transport d'énergie, comment le caractériser et comment caractériser une intensité sonore ?*

# 2 Aspects énergétiques

## 2.1 Expression de de $\vec{\Pi}$

Bilan local d'énergie :

$$\iiint_V \frac{\partial e}{\partial t}\ \mathrm{d}\tau = \oiint_{S_V} \mathbf{\Pi} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = \iiint_V \mathrm{div}\ \ \mathbf{\Pi}\ \ \mathrm{d}\tau \quad \Longrightarrow \frac{\partial e}{\partial t} = -\mathrm{div}\ \ \mathbf{\Pi}$$

Mais quelles expressions de $e$, énergie volumique et $\mathbf{\Pi}$ vecteur densité d'énergie ?

On prend une surface orientée $\mathbf{dS}$ centrée en M, soumise à une force de pression. On suppose qu'une surpression $p_1$ arrive part l'intérieur de la surface

$$\mathbf{dF} = p_1(M,t)\ \mathbf{dS}$$

Il vient d$P$, la puissance exercée par le milieu de gauche, en prenant uniquement la force pressante :

$$\mathrm{d}P = \mathrm{d}\mathbf{F} \cdot \mathbf{v}_1(M,t) \equiv \mathbf{\Pi} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S}$$

On trouve

$$\mathbf{\Pi} = p_1(M,t)\ \mathbf{v}_1(M,t)$$

On peut alors revenir à l'énergie volumique $\frac{\partial e}{\partial t} = -\mathrm{div}\ \ \mathbf{\Pi}$

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial e}{\partial t} &= -\text{div } \ \mathbf{\Pi} = -\text{div } (p_1(M,t))\ \mathbf{v}_1(M,t) \\
&= -p_1 \text{ div } \mathbf{v}_1 - \text{grad}(p_1)\cdot\mathbf{v}_1 \\
&= p_1\left(\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial \rho_1}{\partial t}\right) + \left(\rho_0\frac{\partial \mathbf{v}_1}{\partial t}\cdot\mathbf{v}_1\right) \qquad \text{avec} \quad \rho_1 = \rho_0\chi_S p_1 \\
&= \chi_S p_1 \frac{\partial p_1}{\partial t} + \rho_0 \mathbf{v}_1 \cdot \frac{\partial \mathbf{v}_1}{\partial t}
\end{aligned}
$$

On en tire, en prenant l'énergie nulle l'énergie de l'ordre 0 car correspondant à une absence d'onde et en oubliant l'ordre 1 car de moyenne temporelle nulle :

On exprime alors l'énergie volumique en deux termes :

$$e(M,t) = \frac{1}{2}\chi_S {p_1}^2(M,t) + \frac{1}{2}\rho_0 {\mathbf{v}_1}^2(M,t)$$

On peut montrer que le premier terme est lié au travail des forces pressantes, tandis qe le deuxième est un terme cinétique.

**Remarque**

Pour une OPPS on a

$$p_1 = f(t-\frac{x}{c}) \implies \mathbf{v}_1 = \frac{1}{\rho_0 c} f(t-\frac{x}{c})\,\mathbf{e_x}$$

On a alors

$$e_c = \frac{1}{2}\rho_0\mathbf{v}_1^2 = \frac{1}{2}\frac{1}{\rho_0 c^2} f(t-\frac{x}{c}) \qquad \text{et} \qquad e_p = \frac{1}{2}\chi_S p_1^2$$

Comme $c^2 = \frac{1}{\rho_0\chi_S}$, on obtient

$$e_p = e_c \quad \forall x,t \implies e = 2e_c = 2\times\frac{1}{2}\rho_0\mathbf{v}_1^2 = \frac{1}{\rho_0 c^2} f^2(t-\frac{x}{c})$$

De plus, $\mathbf{\Pi} = \rho_1\mathbf{v}_1 = \frac{1}{\rho_0 c} f^2(t-\frac{x}{c})\ \mathbf{e_x}$ donc

$$ec\ \mathbf{e_x} = \mathbf{\Pi}$$

Notons $c_e$ la vitesse de propagation de l'énergie. Soit une surface orientée d$\mathbf{S}$, l'énergie E contenue dans le volume $\mathrm{d}\tau = (\mathrm{d}S\mathrm{d}tc_e)$ est $E = e(\mathrm{d}S\mathrm{d}tc_e)$. Comme $E = \mathbf{\Pi}\cdot\mathrm{d}\mathbf{S}\mathrm{d}t$, il vient $c = c_e$, l'énergie acoustique se propage à la même vitesse que l'onde.

## 2.2 Notion d'intensité sonore

L'intensité acoustique $I$ est définie comme $\boxed{I = \langle||\mathbf{\Pi}||\rangle_t}$.

**OdG**

Sensibilité humaine à 4 000 Hz, entre $10^{-12}$ (seuil d'audition) et $1\mathrm{W}\cdot\mathrm{m}^{-2}$ (seuil de douleur). À quels $p_1$ et $\vec{v}_1$ correspondent ces $I$ ?

OPPH dans l'air, $\mathbf{\Pi} = \frac{1}{\rho_0 c} p_{1,m}^2 \cos^2(\omega(t-\frac{x}{c}))\vec{e_x}$ ce qui donne $\langle \vec{\Pi}\cdot\vec{e_x}\rangle_t = \frac{p_{1,m}^2}{2\rho_0 c}$

**Retour sur les hypothèses**

Pour $I = 10^{-12}\ \mathrm{W}\cdot\mathrm{m}^{-2}$, avec $c = 340\ \mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ et $\rho_0 = 1.2\ \mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3}$, on trouve $p_{1,m} = 3\cdot 10^{-5}$ Pa $\ll 1$ atm et $||\vec{v}_1|| = 7\cdot 10^{-8}\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1} \ll c$.
Et de même, avec $\rho_1 = \rho_0\chi_S p_1 = \frac{M}{\gamma RT}p_1 = 2.5\cdot 10^{-10}\ \mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3}$ on trouve que $||\frac{\rho_0\partial_t\vec{v}_1}{\rho_1\vec{g}}|| = 6.8\cdot 10^2$ donc on a bien fait de négliger la pesanteur.

Malheureusement avec ces valeurs, on trouve dans le pire des cas Re $= ||\frac{\rho_0\vec{v}_1 L}{\eta\Delta\vec{v}_1}|| =$ avec L la distance sur laquelle bougent les particules de fluide : $L = 2v_{1,m}\times\nu/2 \sim 10^{-4}$ pour $\nu = 1500$ Hz alors Re $\sim \frac{1\cdot 10^{-8}\cdot 10^{-4}}{10^{-5}} = 10^{-7}$ donc on ne peut en fait PAS DU TOUT négliger la viscosité ! Mais bon c'est qu'un modèle et au final il marche pas trop mal (cf. calcul de la vitesse dans l'air).

Pour $I = 1\ \mathrm{W}\cdot\mathrm{m}^{-2}$, on a $p_{1,m} = 30$ Pa, ce qui correspond à une pression hydrostatique à une profondeur de 3 mm ! C'est la vibration à une surpression de 30 Pa qui fait mal aux narines !
$I$ audible sur 12 ordres de grandeur donc on utilise une échelle log : $I_{db} = 10\log(\frac{I}{I_0})$ avec $I_0 = 10^{-12}\ \mathrm{W}\cdot\mathrm{m}^{-2}$.

**Application : modèle de la shpère pulsante**

sources d'ondes sphériques donc

$$p_1(r,t) = \frac{1}{r}p_{1,m}\ \cos\left(\omega\left(t-\frac{r}{c}\right)\right)$$

$$\vec{v}_1 = \frac{p_{1m}}{\rho_0 c}\ \cos\left(\omega\left(t-\frac{r}{c}\right)\right)\ \vec{e}_r + \frac{p_{1m}}{\rho_0 r^2\omega}\ \cos\left(\omega\left(t-\frac{r}{c}\right)\right)\ \vec{e}_r$$

On suppose qu'on se place loin donc on ne garde que le terme de champ lointain pour calculer la puissance

$$<\vec{\Pi}> = \frac{p_{1m}^2}{2\rho_0 c r^2}\vec{e}_r$$

Et on peut lier $p_{1m}$ aux caractéristiques de la source : on considère une sphère dont la membrane vibre en $R(t) = R_0 + a_0\ \cos(\omega t+\phi)$ alors la condition aux limites de non-décollement (on ne garde cette fois-ci que le terme de champ proche) donne $p_{1m} = a_0\rho_0\mathbb{R}_0^2\omega^2$ donc en intégrant $<\vec{Pi}>$ sur une shpère de rayon $r$ on obtient une puissance rayonnée

$$\mathcal{P} = \frac{\pi a_0^2\rho_0\mathbb{R}_0^4\omega^4}{c}$$

Donc pour balancer des grosses basses bien sales, il faut des fats enceintes (si $\omega$ diminue et qu'on veut toujours autant de puissance, bah il faut augmenter $\mathbb{R}_0$ et $a_0$).

> *Mais jusqu'ici on a tout décrit dans un seul milieu, alors que quand je suis chez moi, je n'entend (théoriquement) pas mes voisins ni la rue... Comment évolue l'onde sonore au passage d'une interface ? On peut s'attendre comme en EM à des phénomènes de réflexion / transmission.*

# 3 Propriétés d'onde : réflexion / transmission

## 3.1 Impédance

Considérons que les grandeurs couplées sont $p_1$ et $\vec{v_1}$ et plaçons dans le cas d'une OPP se propageant selon $+x$ :

$$p_1 = f(t - \frac{x}{c}) \implies \vec{v_1} = \frac{1}{\rho_0 c} f(t - \frac{x}{c})\vec{e_x} = \frac{1}{\rho_0 c} p_1 \vec{e_x}$$

Donc le milieu peut-être caractérisé par une constante appelée **Impédance**

$$\boxed{Z \equiv \frac{p_1}{||\vec{v_1}||} = \rho_0 c = \sqrt{\frac{\rho_0}{\chi_S}}}$$

**Analogie**

C'est comme dans un câble coaxial avec

Ondes acoustiques $\longleftrightarrow$ Câble coaxial

$$\begin{aligned} \vec{v_1} &\leftrightarrow i \\ p_1 &\leftrightarrow u \\ \rho_0 &\leftrightarrow \Gamma \\ \chi_S &\leftrightarrow \Lambda \end{aligned} \qquad \begin{aligned} c = \frac{1}{\sqrt{\rho_0 \chi_s}} &\leftrightarrow c = \frac{1}{\sqrt{\Gamma\Lambda}} \\ Z = \sqrt{\frac{\rho_0}{\chi_S}} &\leftrightarrow Z = \sqrt{\frac{\Gamma}{\Lambda}} \end{aligned}$$

## 3.2 Conditions aux limites

Lorsqu'une onde passe d'un milieu d'impédance $Z_1$ à un milieu $Z_2$, $\vec{v_1}$ et $p_1$ doivent vérifier des relations de continuité, en effet :

- Il ne peut pas y avoir de décollement de matière donc la vitesse doit être le même de chaque côté de l'interface
- Considérons une tranche de fluide à l'interface de section $S$ et dont l'épaisseur (donc la masse) tend vers 0. Le PFD dit que la somme des forces extérieure est nulle, donc $p(\text{avant})S - p(\text{apres})S = 0$ d'où la continuité de $p$.

## 3.3 OPP en incidence normale sur un dioptre plan

On considère le cas du titre (faire un schéma !), on a alors

**Onde incidente** $p_i(x,t) = f(t - x/c)$
$\vec{v_i}(x,t) = 1/Z_1 f(t - x/c_1)\vec{e_x}$

**Onde réfléchie** $p_r(x,t) = g(t + x/c_1)$
$\vec{v_r}(x,t) = -1/Z_1 g(t + x/c_1)\vec{e_x}$

**Onde transmise** $p_t(x,t) = h(t - x/c_2)$
$\vec{v_t}(x,t) = 1/Z_2 h(t - x/c)\vec{e_x}$

Alors on peut définir les coefficients de réflexion et transmission (en pression) :

$$r = \frac{p_r}{p_i} = -\frac{v_r}{v_i} \qquad t = \frac{p_t}{p_i} = \frac{Z_2}{Z_1}\frac{v_t}{v_i}$$

Les relations de passage donnent (en 0)

$$f(t) + rf(t) = tf(t) \implies 1 + r = t$$
$$\frac{1}{Z_1}f(t) - \frac{r}{Z_1}f(t) = \frac{t}{Z_2}f(t) \implies \frac{1}{Z_1} - \frac{r}{Z_1} = \frac{t}{Z_2} = \frac{1+r}{Z_2}$$

On obtient les expression (de même qu'en optique)

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \qquad t = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

Les coefficients en énergie sont définis à partir des vecteurs de Poynting :

$$R = \frac{||\Pi_r||}{||\Pi_i||} \qquad T = \frac{||\Pi_t||}{||\Pi_i||}$$

$$R = r^2 = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \qquad T = \frac{Z_1}{Z_2}t^2 = 4\frac{Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

**Remarques**

- Lorsque $Z_1 = Z_2$ on n'a pas de réflexion $\implies$ adaptation d'impédance (cf. echographie)
- Lorsque les impédances sont très éloignées (corps massif), on n'a pas de transmission (cf. ondes stationnaires)
- Application au double vitrage :
  Simple vitrage = (air) - (verre) - (air) $\implies$ transmission $T_1 = 2.5 \cdot 10^{-8}$ donc une atténuation de 76 dB
  Double vitrage = (air) - (verre) - (air) - (verre) - (air) $\implies$ transmission $T_2 = T_1^2$ donc une atténuation de 152 dB

# Compléments

— **Ondes sonores dans la mer** : Sonar sonore plus efficace car moins d'atténuation avec ondes acoustiques que électromagnétiques.
Quelques OG : $c_{eau} = 1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $Z_{eau} = 1.5 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$
Les mirages sonores sont très fréquents : le rayon sonore se courbe vers les basses vitesses. Donc vu le profil, de la vitesse du son, il existe une profondeur autour de laquelle voyagent es ondes

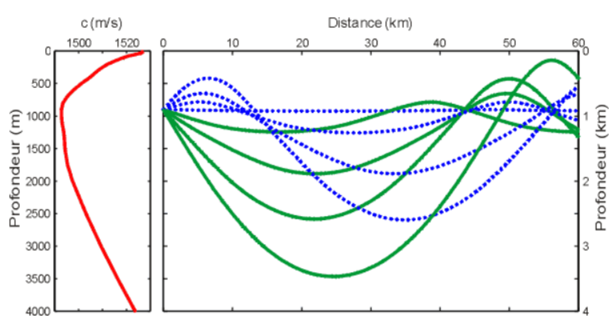


FIGURE 3.1 – Coucou

— **Effet Doppler** : pour une source qui arrive en plein sur l'observateur on a

$$f' = \frac{f}{1 + v/c}$$

Et si elle s'éloigne dans la même direction on met un signe - à la place du $+$.

— **Absorbtion dans un solide** : En vérité en plus de l'onde réfléchie et de l'onde transmise dans un solide, il y a parfois de l'absorbtion en surface. Celle-ci peut dépendre de la fréquence (cf. Grosses basses sa mère en sortie de boîte).

# Questions

- **hypothèse : transfos adiabatiques, pas plus d'hyp nécessaires ?** // adiabatique réversible pour Laplace
- **pesanteur négligée, pourquoi ?** // si on l'avait gardée, Euler change , ordre 0 = pression hydrostatique et ordre 1 / si tu mets une pesanteur, même équation / p0 et rho0 non uniformes avec g
- **on compare quels équilibre pour dire que c'est adiabatique ?** / Diffusion en L$^2$ tau on compare eq thermique avec eq méca
- **conservation de la masse** / il faut $p_0$ uniforme c'est pour ça qu'on néglige g
- possible d'avoir ondes acoustiques sans hyp isentrope // hyp isotherme je pense que le son se propage pas / près d'un réacteur on entend quand même / ondes non-linéaires ? / corde avec torsion, tsunami, onde de choc, soliton
- **def pour I, quelle moyenne ?** // temps de relaxation de l'oreille, moyenne sur le temps / moyenne toujours pertinente ? / pour les ondes basses fréquence c'est pas ouf
- **conservation énergie, détailler le passage de Pi à u** // ez champion ! et si y a une constante elel rentre pas dans le cadre de la propag de l'onde
- la forme de u en p1$^2$ et v1$^2$ impose la continuité de p1 et v1 aux interfaces
- expression de l'expression qui vire rho1 g, dv/dt c'est v1m nu, on mq que $\lambda$ doit être plus gd que c$^2$/g, marche bien pour océan, pas bien pour atmosphère
- **partie III beaucoup construite sur analogie avec coax, quel rôle des prérequis (EM, Méca Flu, Lois de conservation) ? EM faut préciser un peu plus, c'est un peu trop large, peut-être un prérequis sur les ondes en elle-même** //
- **sens physiquer de l'impédance** // manière dont sont couplées pression et vitesse et ex sur un mur, je le définirais sur un ex de réfélxion/transmission
- **analogie avec coax très pertinente, peut-être encore plus la pousser. Comment faire pour avoir un équivalent du câble coax avec des ondes acoustiques, faut l'illustrer du point de vue physique**

**Qu'est ce que l'approximation acoustique ?**
**Pourquoi introduire une équation basée sur l'isentropisme ? Historiquement quelle a été la première hypothèse posée ? Qu'est ce qui change si on fait l'hypothèse isotherme ?**
**Quel est l'intérêt physique de présenter la solution en OPPH ?**
**Pourquoi rot(v)=0 est important ici ?**
**Retour sur l'adiabatisme et le coefficient de compressibilité isentrope. Quel lien avec le fluide parfait ?**
**Faut-il nécessairement avoir un fluide parfait pour espérer être adiabatique ici ?**
**Comment mettre en place le modèle pour les solides (les grandes lignes) ?**
**Sur l'expérience : comment faire si tu n'as pas de mode burst sur les gbf du lycée ?**
**Comment expliquer l'impédance de manière plus physique ?**

**À combien de chiffres significatifs connaît-on le coefficient thermodynamique gamma ?** Le coefficient $\gamma$ a ceci de particulier qu'il vaut $7/5 = 1.4$ exactement (et non $\simeq 1.40...$). C'est une valeur théorique qui vient de la physique statistique (gaz diatomique à température ambiante)

**Que se passe-t-il si le fluide a une petite vitesse $v0 \ll cs$ ?** L'onde est advectée par le fluide à la vitesse v0.

**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.

**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 son par une porte entrouverte pour la diffraction.

**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.

**Qu'est ce qu'un gaz parfait ?** Un gaz constitué de particules élémentaires ponctuelles, indiscernables et sans interaction.

**Vous avez montré que cs 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.

**Pourquoi il faut que la moyenne temporelle des perturbations soit nulle ?**

**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 ?**

**Pourquoi on utilise l'équation d'Euler pour décrire ce fluide ?** Fluide parfait

**Que se passe-il si on a un écoulement permanent dans le fluide ?**

**Vous avez pris 300 K pour la température, qu'avez-vous pris pour les autres grandeurs : gamma et masse molaire ?**

**Pourquoi physiquement le son se propage plus vite dans un liquide et encore plus vite dans un solide ?** Interactions donc coeff de compressibilité faible

**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 ? 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 ?**

**À combien de chiffres significatifs connaît-on le coefficient thermodynamique gamma ?** Le coefficient $\gamma$ a ceci de particulier qu'il vaut $7/5 = 1.4$ exactement (et non 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 cs 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.