

LP25 : Ondes acoustiques

L2

Prérequis : Mécanique des fluides, thermodynamique L2, ondes (électromag) L2

Bibliographie :

- [1] OLIVIER, *Physique des ondes* (53.4 OLI), le livre date de 96 il était peut-être un peu trop vieux, le cours doit être aussi dans les tec et doc PC.
- [2] FRERE, *Physique des ondes* (53.4 FRE)
- [3] GARING, *Ondes mécaniques et diffusion* (53.6 GAR), exercices corrigés
- [4] ZANANIRI, *Musique et physique* (53.3 ZAN)

Intro :

Après avoir vu les ondes électromagnétiques en détail, on va s'intéresser aux ondes dans un autre domaine de la physique → Ondes acoustiques

(ça raccourcit un peu les calculs)

Dire des trucs bateaux comme quoi on les expérimente tous les jours, c'est trop intéressant et tout !

Plan :

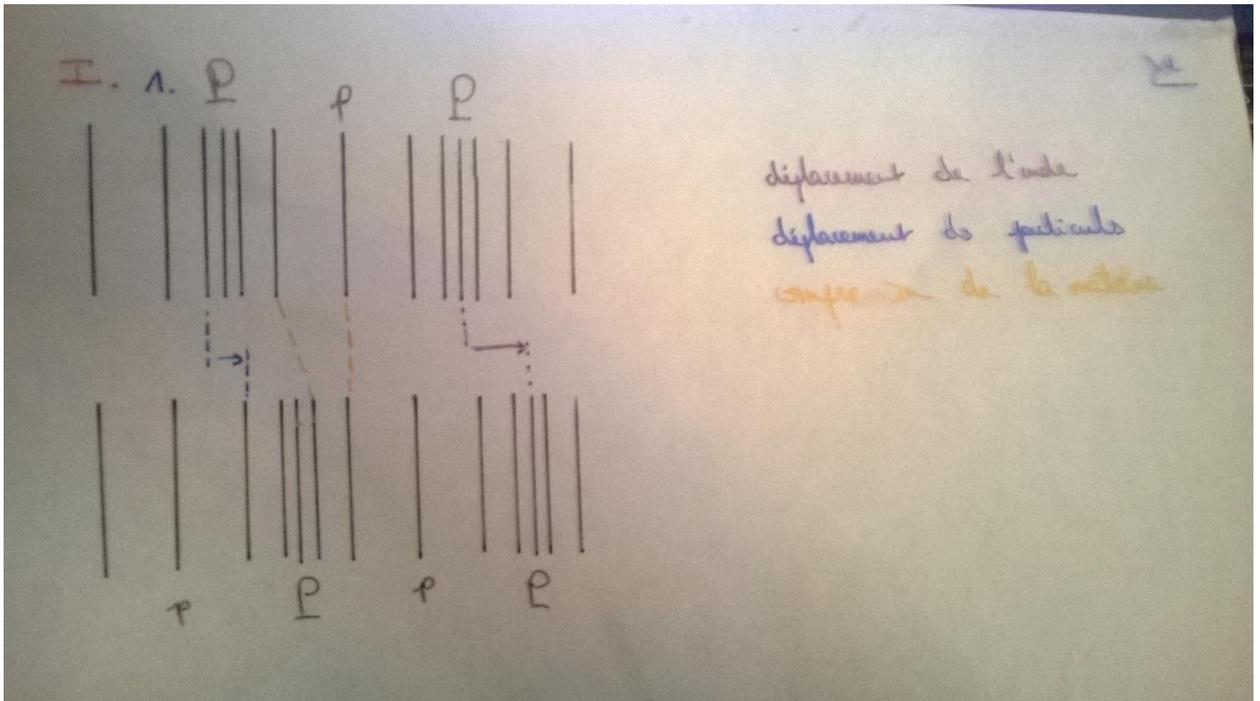
- I. **Equation d'onde**
 1. Hypothèses
 2. Mise en équation
 3. Propagation
- II. **Aspects énergétiques**
 1. Energie acoustique volumique
 2. Application aux OPP et retour sur la validité des hypothèses
- III. **Impédance acoustique et applications**
 1. Impédance acoustique
 2. Application à la transmission à travers une cloison : isolation
 3. Facture des instruments à vent

Remarques du correcteur en bleu

I. Equation d'onde

1. Hypothèses

- a) **Grandeurs qui se propagent** : *Bien, il faut prendre son temps sur le début*
Schéma sur transparent avec des tranches de fluides, et une onde compression/dépression qui se propage



Pression, masse volumique, vitesse (/ !\ penser à dire qu'il n'y a pas de vitesse de groupe)

- b) **Hypothèse acoustique** :

Petite perturbation

Equilibre

$$P = P_0$$

$$\rho = \rho_0$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{0}$$

Après le passage de l'onde

$$P = P_0 + P_1$$

$$\rho = \rho_0 + \rho_1$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_1$$

$$P_1/P_0 \ll 1$$

$$\rho_1/\rho_0 \ll 1$$

$v_1 \ll ?$ On suppose a priori v_1 petit et on verra plus tard

- c) **Fluide parfait** → pas de viscosité
d) **On néglige la pesanteur**, à préciser

2. Mise en équation

a) Equation d'Euler

On écrit l'équation, on ne garde que les termes d'ordre 1

On enlève ce qui se simplifie par l'équation à l'équilibre : $\mathbf{0} = -\text{grad}P_0 + \rho_0 \mathbf{g}$

On aurait pu enlever directement le terme de pesanteur et négliger les variations de P et ρ à l'équilibre ç'aurait accéléré les calculs. Après dans les questions on peut préciser

On néglige enfin le terme $\rho_1 \mathbf{g}$ de pesanteur

On obtient

$$\rho_0 \cdot d\mathbf{v}_1/dt = -\text{grad}P_1$$

b) Conservation de la masse

On effectue le DL1, puis on compare les termes $\rho_0 \cdot \text{div}(\mathbf{v})$ et $\mathbf{v}_1 \cdot \text{grad}(\rho_0)$ comme fait dans [2]

On trouve finalement

$$d\rho_1/dt + \rho_0 \cdot \text{div}(\mathbf{v}_1)$$

Il manque encore une équation, d'où vient-elle ?

c) Thermodynamique

On a dit qu'on était dans le cadre d'un fluide parfait → évolution réversible

+ on fait l'hypothèse que l'évolution est adiabatique

→ On obtient une transformation isentropique de la matière.

On introduit χ_s le coefficient de compressibilité isentropique.

On peut alors faire comme dans [3] ou comme dans [1] pour retrouver

$$\rho_1 = \rho_0 \cdot \chi_s \cdot P_1$$

Il vaut mieux faire comme dans le [1], c'est le nouveau truc des nouveaux programmes, et Olivier a participé à leur élaboration. C'est comme ça qu'il faut faire avec les dérivées partielles.

3. Propagation

Comme on préfère exprimer les CL en p ou en \mathbf{v} , on élimine d'abord ρ .

Puis on garde P (scalaire, c'est plus pratique)

On obtient finalement l'équation de d'Alembert.

$$\Delta P - \rho_0 \cdot \chi_s \cdot (d^2 P_1/dt^2) = 0$$

Surtout ne pas écrire l'équation en vitesses, on perd du temps et ça n'apporte rien.

On introduit la célérité c, et comme on a déjà résolu cette équation dans le cours d'électromag on sait à quoi ça correspond. On pourra passer en complexe et résoudre avec des OPP.

Commentaires sur c :

- Propagation non dispersive
- c est décroissante en ρ_0 et en χ_s , mais comme en général plus un matériau est dense moins il est compressible (penser à gaz → liquides → solides) on a du mal à voir comment ça va marcher.

En pratique l'effet de la **compressibilité** domine ([1] ou [3] je sais plus trop)
Ordres de grandeur...

- Calcul pour le GP : (loi de Laplace $\rightarrow \chi=1/(\gamma P) \rightarrow c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$
 γ (GP diatomique) = 7/5, on trouve bien 343m/s pour l'air

II. **Aspects énergétiques** *Il faut en parler on n'a pas le choix, sinon on ne peut pas valider les hypothèses.*

1. **Energie acoustique volumique [2]**

a) **Approche** *Cette partie est superflue. Passer directement au b.*

Il y a un exercice dans le Garing sur ça. On calcule séparément les contributions de l'énergie cinétique et de l'énergie interne. C'est un peu rébarbatif, on trouve

$$\langle e_c \rangle = \frac{1}{2} \rho_0 v_1^2$$
$$\langle u \rangle = \frac{\langle P_1^2 \rangle}{2 \rho_0 c^2}$$

b) **Vecteur puissance surfacique [1] et [3]**

C'est fait dans les deux livres, on introduit $\mathbf{R} = P_1 \mathbf{v}$ dont le flux surfacique vaut une puissance. On peut vérifier facilement que :

$$\text{div} \vec{R} = - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$$

Où $\varepsilon = \langle e_c \rangle + \langle u \rangle$

Du coup si on n'a pas fait le a) dans cette partie il faut commenter les 2 termes et donner leur interprétation physique.

2. **Application aux OPP**

a) **Calcul de l'énergie**

Avec l'équation d'Euler en complexes on a $P_1 = \rho_0 c v$, et on calcule les deux contributions énergétiques, on montre qu'elles sont égales.

Alors $\mathbf{R} = c \varepsilon \mathbf{u}$ où \mathbf{u} est un vecteur unitaire colinéaire à \mathbf{v} et de même sens.

Commentaire : l'énergie se propage à la vitesse c , c'est normal on n'a pris en compte aucun phénomène d'atténuation

b) **Validité des hypothèses [3]**

On imagine une onde acoustique qui transporte une puissance de $1000 \text{ W/m}^2 = \langle |\mathbf{R}| \rangle$

C'est beaucoup ! A titre de comparaison le seuil de douleur est à 1 W/m^2 , donc on imagine bien que si cette onde rentre dans nos hypothèses ça sera le cas en général pour les ondes de la vie de tous les jours... On va vérifier les hypothèses faites pour les 3 grandeurs P , v et q .

Le calcul fait dans [3] avec une OPP donne

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2 \langle |\vec{R}| \rangle}{\rho_0 c}} \sim 0,8 \text{ m/s}$$

On ne peut comparer cette valeur qu'à c qui est la seule vitesse qui apparaît dans le problème.
On a bien $v_{max} \ll c = 340 \text{ m/s}$

Ensuite on a $P_{max} = \rho_0 c v_{max} \approx 300 \text{ Pa} \ll P_{atm}$

$$\text{Puis } \rho_1 / \rho_0 = \chi_s P_1 = \frac{1}{\gamma} \frac{P_1}{P_0} \ll P_1$$

On revient ensuite sur la pesanteur en comparant $\rho_1 g$ à $\|\text{grad } P\|$.

(Attention aux distances caractéristiques de variation !)

*On perd du temps sur la pesanteur et c'est pas forcément très intéressant.
Laisser tomber. S'il faut vérifier quelque chose de plus c'est l'hypothèse adiabatique. En revanche il faut pouvoir répondre à des questions.*

III. Impédance acoustique – Applications *On peut faire les calculs sur transparent pour gagner du temps*

1. Impédance acoustique [1] et [3]

On a déjà établi que pour une OPP $P_1 = c \rho_0 v_1$.

On remarque que le rapport P_1/v_1 ne dépend pas de la pulsation de l'OPP, on a donc ce même rapport pour toutes les opp et donc pour des combinaisons linéaires...

On définit l'impédance acoustique $Z = P_1/v_1 = c \rho_0$

Commentaires : notion d'impédance, comparaison avec l'électromag, changement de signe quand on change le sens de propagation

ODG: $Z(\text{air}) = 400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $Z(\text{eau}) = 1,4 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

2. Application à la transmission à travers une cloison [2] *On peut faire une analogie avec l'électromag, mettre le coax dans les prérequis par exemple et ne pas faire le calcul*

Il y a un exercice dans le Garing, j'ai tout fait comme dans le livre, mais je me suis arrêtée à l'expression de \underline{t} en amplitude.

$$\underline{t} = \frac{1}{1 + \gamma \omega \frac{\sigma S}{2 \rho_0 c}}$$

On voit bien que c'est un passe bas !

3. Facture des instruments à vent (pas eu le temps de le mentionner) [4]

Dans un instrument à vent en fait $Z(\lambda)$. Non seulement la cavité a différents modes propres qui peuvent vibrer ou non suivant la façon dont on l'excite (souffle du musicien), mais ils sont plus ou moins favorisés suivant l'impédance de la pulsation.

De cette manière on favorise la propagation d'un maximum d'harmoniques pour rendre le son plus riche. (Une simple sinusoïde sonne très mal et est désagréable à l'oreille)

Autres applications possibles :

- 1. Comme la propagation des ondes est réversible on peut focaliser les ondes acoustiques facilement sur un point particulier. Par exemple en médecine on envoie des ultrasons sur un caillot et on enregistre les ondes réfléchies. Puis on réémet avec une plus grande puissance des ondes dans l'ordre inverse de ce qu'on a reçu → focalisation sur le caillot ce qui permet de le détruire.*
- 2. Pavillons acoustiques, il y a un exercice dans le Garing*

Conclusion bateau : on a tout traité en OPP en fait c'est plus compliqué, y a des atténuations (cf exercice dans le Garing [2], mais si on le mentionne on aura des questions☺). En outre la propagation dans les solides qu'on n'a pas traitée est plus compliquée

QUESTIONS/COMMENTAIRES

- ***Est-ce que l'hypothèse d'adiabaticité est valable ou pas ? Si oui dans quel domaine de fréquence ?***
Je n'ai pas su répondre, apparemment il faut comparer les flux thermiques à la variation d'énergie interne.
 $\delta Q/dU = \lambda \Delta T / (\rho c \cdot dT/dt) = D_{th} f^2 / (cf) = 10^{-5} f / 10^5 \ll 1$ ie $f \ll 10^{10} \text{Hz}$
(la compression du fluide se fait sur une taille de l'ordre de la longueur d'onde)
C'est valable aux BF. Aux HF les gradients de températures dus aux phénomènes de compression/dépression sont trop forts (longueurs d'ondes trop faibles).
En outre 10^{10}Hz correspond à une longueur d'onde de l'ordre de 30nm, c'est-à-dire de l'ordre de la distance entre les particules. On met en défaut l'approximation des milieux continus. C'est plus important que l'hypothèse adiabatique de toutes manières.
- ***Quelles autres solutions pour l'équation de d'Alembert que les OPP ?***
- ***Vous avez pris en compte ρ_0 , pourquoi ?***
C'est la variation de la masse volq dans l'atmosphère due à la gravité. Le correcteur dit qu'on aurait pu la négliger tout de suite ç'aurait simplifié les calculs !
- ***Comment se passe la propagation d'une onde acoustique dans les solides ?***
Il y a des ondes longitudinales et transversales, vitesse beaucoup plus grande.
 $c_{sol} \approx 3c_{liq}$

- **Quand on mesure un volume sonore pourquoi utiliser les décibels ?**
L'ouïe humaine est sensible à des valeurs logarithmiques, ça nous permet d'avoir une plus grande plage de sensibilité
- **Que se passe-t-il dans la manip avec un réveil sous une cloche à vide ?**
J'hésite et je mentionne les deux explications (le son ne se propage plus dans le vide, mais aussi problème d'adaptation d'impédance)
En fait le correcteur m'explique que le jury s'est mis d'accord, c'est bien un problème d'adaptation d'impédance.
En effet la propagation ne dépend pas de ρ (par exemple c ne dépend pas de ρ). Le seul moyen d'empêcher cette propagation est de mettre en défaut l'approximation des milieux continus. La distance entre les particules $1/N^{1/3}$ est de l'ordre de 30nm dans la cloche à vide (on atteint une pression de 10^4 Pa, pas moins). Cette distance est bien inférieure à la longueur d'onde, il n'y a donc pas de problème pour la propagation de l'onde.
- **Comment marchent les émetteurs d'ultrasons à quartz qu'on a ?**
(Il veut parler de ceux qu'on utilise pour mesurer la célérité dans l'air) C'est un effet piezo.
« **Vous les avez sûrement déjà manipulés, il faut les exciter à une fréquence bien particulière, pourquoi ?** » en fait je me souviens pas du tout de ça, je vois pas trop de quoi il parle. Un effet de résonance interne au quartz sûrement de toutes manières.
Il explique que c'est un passe bande, et que dans les montres il y a des quartz taillés en forme de diapasons pour rendre la résonance encore plus aiguë.
- **Pourquoi quand on pose un diapason sur une table il fait du son alors que quand on le frappe et qu'on le tient en l'air on n'entend presque rien ?**
Le diapason transmet de la puissance à la table qui vibre sur toute sa surface, elle excite un plus grand volume d'air → son plus fort
- **Pourquoi est-ce que quand on inspire de l'He on a une voix plus aiguë ?**
La taille de la cavité est fixée (bouche), or la célérité du son dans He est plus grande que dans l'air, la fréquence augmente donc.
Oui mais pourtant quand on chante par exemple on peut changer la hauteur des notes ?
Avec les cordes vocales on excite différemment la cavité, ce que je veux dire c'est que pour une même excitation (on parle toujours à la même hauteur je pense...) la fréquence sera plus élevée dans l'He que dans l'air.