Titre : LP On2 – Ondes Acoustiques

Présentée par : Paul Seguigne **Rapport écrit par** : Baptiste Corrège

Correcteur : Phillipe Gondret **Date** : 07/02/2023

Bibliographie		
Titre	**Auteurs**	**Éditeur**
Tec et Doc		
Dunod MP/ PCSI		

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : CPGE (PC/PSI)

Pré-requis : écoulement parfait, transformation thermodynamique, Gaz Parfait, diffusion thermique, électromagnétisme dans le vide, diffusion thermique

---

Introduction : L'onde acoustique est la propagation d'une onde mécanique, couplage entre le champ de pression et le champ de vitesse, dans un milieu matériel.

I. Mise en équations des ondes acoustiques

a. Modèle et approximations

Animation : propagation d'une onde plane sonore dans un tube

L'onde est une perturbation par rapport à un état d'équilibre.
Pour un fluide au repos :

$$P = P_0 + P_1$$
$$\mu = \mu_0 + \mu_1$$
$$\vec{v} = \vec{0} + \vec{v_1}$$

Hypothèses : fluide parfait barotrope, écoulement parfait, sans atténuation

Approximation acoustique : développement limité au 1er ordre par rapport à l'état d'équilibre, approximation isentropique

b. Equation de propagation

- **Conservation de la masse :**

$$div(\mu_0\overrightarrow{v_1}) + \mu_0\frac{\partial\overrightarrow{v_1}}{\partial t} = 0$$

- **Equation d'Euler :**

$$\mu\frac{D\vec{v}}{Dt} = -\vec{\nabla}P \Longrightarrow \mu_0\frac{\partial\overrightarrow{v_1}}{\partial t} = -\vec{\nabla}P_1$$

- **Relation entre champ couplés :**

$$\chi_S = \frac{-1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_S = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial \mu}{\partial P}\right)_S \Longrightarrow \frac{\partial \mu_1}{\partial t} = \mu_0\chi_S\frac{\partial P_1}{\partial t}$$

En combinant ces 3 équations, on aboutit à

- **Equation de D'Alembert :**

$$\mu_0\chi_S\frac{\partial^2 P_1}{\partial t^2} = \Delta P_1$$

$$\mu_0\chi_S\frac{\partial^2 \overrightarrow{v_1}}{\partial t^2} = \Delta\overrightarrow{v_1}$$

- **Célérité :**

$$\boxed{c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\chi_S}}}$$

c. Célérité

Homogénéité : μ_0 en kg/m^3 et χ_S en Pa^{-1} et donc en kg^{-1} m s², donc c en m/s

Le coefficient χ_S permet de justifier le caractère isentropique de la transformation subie par le fluide, donc du caractère adiabatique. Donc :

$$T_{diff} \simeq \frac{L^2}{D_{th}} \gg T_{onde} \simeq \frac{L}{c}$$

Application numérique : $T_{onde}/T_{diff} = fD_{th}/c^2 \sim 2.10^{-6} \ll 1$ pour 20kHz

La loi de Laplace s'écrit $P\mu^{-\gamma} = cste$, d'où :

$$\frac{dP}{P} = \gamma\frac{d\mu}{\mu} \Longrightarrow c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

Application numérique : $\boldsymbol{c \simeq 344\ m/s}$

Manipulation : mesure de la vitesse du son dans l'air.

Ecran : vitesse du son dans l'air, l'eau et dans un solide.

II. Impédance acoustique et énergie

a. Impédance acoustique

Hypothèse : dans le cas d'une onde plane progressive harmonique (OPPH) le champ de pression prend la forme

$$P_1(r,t) = Ae^{i(\vec{k}\vec{r}-\omega t)}$$

Une onde acoustique est une onde longitudinale : $\vec{k}//\vec{n}$

On montre alors que l'impédance acoustique est :

$$\boxed{Z_{OPP} = \frac{P_1}{v_1} = \mu_0 c = \sqrt{\frac{\mu_0}{\chi_S}}}$$

b. Intensité sonore

Le vecteur de Poynting donne la puissance transportée par l'onde. Pour une onde acoustique :

$$\vec{\Pi} = P_1\vec{v_1}$$

L'intensité acoustique est ainsi :

$$I = <\vec{\Pi}\vec{n}>$$

Si définie en décibels :

$$I_{dB} = 10\,log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Ecran : niveaux d'intensité sonore

III. Production et détection d'onde acoustique

a. Sphère pulsante

On étudie une sphère de rayon variant au cours du temps :

$$R(t) = r_0 + acos(\omega t)$$

(…)

Fin du chrono, pas le temps de finir la leçon…

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

- Comment définir l'intensité ?
  C'est $I_{dB} = 10log(I/I_0) = 20log\left(P/P_{ref}\right)$ *avec* $P_{ref} = 2.10^{-5}Pa$ *défini au seuil de perception de l'audition.*

- Pourquoi en décibel ?
  L'oreille est sensible en base logarithmique.

- D'où vient l'expression de l'impédance acoustique ?
  Des relations de structure (calcul fait au tableau)

- Quelle différence entre un fluide parfait et un écoulement parfait ?

- Dans l'équation d'Euler, à quelle condition les termes non-linéaires sont-ils négligeables ?
  La vitesse doit être faible devant la célérité. Si on fait le rapport du terme de dérivée temporelle et du terme de convection dans le cas d'une onde plane, celui-ci est égal à c/v1 .

- Pourquoi le vent/ la rivière fait du bruit ?
  La rivière et le vent provoquent des perturbations de vitesse et de pression de l'air, qui se propagent sous forme d'ondes acoustiques.

- Pourquoi négliger la gravité ?
  On fait un rapport comme pour les effets non-linéaires. Il apparait une condition sur la fréquence qui doit être plus grande que g/c, correspondant à environ 0,03 Hz, ce qui est donc largement vérifiée dans le domaine audible (> 20 Hz).

- A quelle condition peut-on négliger le terme de dissipation ? Est-ce valable à toutes les fréquences ?

- L'expression de la célérité est-elle valable pour tout fluide ?
  Oui pour le $\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \chi_S}}$

- Qu'est ce que c'est un fluide quasi-incompressible (cf le tableau montrée avec cette appellation pour l'eau)?
  Usuellement, c'est un fluide incompressible. Il n'y a alors pas de propagation d'onde acoustique. L'eau est en général considérée comme un fluide incompressible en mécanique des fluides, mais son caractère (faiblement) compressible doit être considérée pour ce qui concerne la propagation des ondes acoustiques.

- Quel lien entre χ_S et le module d'Young d'un solide ?
  Ils sont inverses l'un de l'autre.

- La différence de célérité dans un gaz, liquide et solide dépend-t-elle uniquement de la masse volumique ?

Non, elle dépend également du coefficient de compressibilité.

- A quoi peut-on comparer la vitesse du son dans l'air ?
  On retrouve l'ordre de grandeur de la vitesse quadratique moyenne de la théorie cinétique des gaz.

- Pourquoi les ondes sont-elles longitudinales ?

- Les variations couplées de vitesse, pression et masse volumique sont-elles en phase ?
  Dans le cas des ondes planes monochromatiques, les oscillations de vitesse sont en phase avec celle de pression (et de densité). Ce n'est plus le cas dans le cas des ondes sphériques.

- Dans un tube, comment est la vitesse tangentielle aux parois ?
  Elle est nulle. Dans le modèle du fluide parfait, il n'y a pas de condition sur la vitesse tangentielle aux parois, mais la condition de non glissement intervient effectivement si le fluide n'est pas parfait.

- Existe-t-il d'autres ondes mécaniques qui peuvent exister dans les fluides ?
  Oui, par exemple des ondes de surface, des ondes internes, des ondes d'inertie.

Commentaires lors de la correction de la leçon

Le plan est ambitieux. Il mérite d'être retravaillé.
Il faut faire des choix : en 40 minutes on ne peut pas être exhaustif. Il ne faut pas simplement effleurer certains points (dans ce cas ne pas les aborder du tout).
Il faut s'entrainer sur un tableau pour bien gérer le temps. On peut rendre optionnelles certaines sous-parties si on n'a pas le temps de tout traiter.

Il faut être capable de montrer quels termes sont négligeables et à quelles conditions.

Le cadre est bien posé, mais fragile au niveau des réponses.

Cela peut être bien de parler d'« équation d'état » pour l'équation qui lie la densité à la pression. C'est classiquement l'équation des gaz parfaits pour les gaz mais cela peut être une équation, notamment pour les liquides.

Manip : très bien d'en faire une, mais un peu laborieux. Rien n'a été marqué au tableau, ce qui rend compliqué à suivre.

Attention à ne pas s'auto-évaluer, le jury est là pour ça. Ne pas faire trop de commentaires superflus, rester concentré sur la physique.

Exemples de « passages obligés » sur cette leçon

Par exemple : présenter un protocole de mesure de vitesse du son dans l'air, ou montrer une application de phénomène de battements.

Titre : Ondes acoustiques

Présentée par : Xavier Alauze **Rapport écrit par** : Romain Taureau

Correcteur : Erwan Allys **Date** : 15/04/2024

Bibliographie		
Titre	**Auteurs**	**Éditeur**
Physique tout-en-un	**M.-N. Sanz**	**Dunod**
Physique Spé. PSI*,PSI	**S. Ollivier**	**Tec et Doc**
Dictionnaire de Physique	**R. Taillet**	**De boeck**

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : CPGE, 2ème année

Pré-requis :
- Equation de d'Alembert et OPPH
- Mécanique des fluides : Fluide parfait, Euler
- Modèle du gaz parfait (GP) : Loi de Laplace
- Impédance , grandeurs couplées

Introduction

Vidéo illustrative d'une onde acoustique (sable/sel sur une enceinte). Définition d'une Onde (Taillet). Discussion sur les milieux.

I/ Propagation d'une onde de pression

A) Fluide : équations et hypothèses :

Hypothèses :
- Fluide parfait → Euler
- Pas de forces ext. (gravité)
- rho_0, p_0, uniformes et $v_0 = 0$.
- 1D

Equations :
1. Euler
2. Conservation de la masse
3. Equation d'état rho=f(p)

B) Approximation acoustique → linéarisation

rho(x,t) = rho_0 + rho_1(x,t), avec rho_1 une perturbation, idem pour p(x,t) et v(x,t). Linéarisation consiste à négliger les termes d'ordre sup à 1 dans les Eq. de la partie précédente.

C) Equation de propagation de d'Alembert.

A partir des considérations précédentes on peut aboutir à une Eq. De d'Alembert où c = 1/sqrt(rho_0 * X_0) Dans le cas d'un GP → c = sqrt(R*T*gamma/M)

D) Mesure de c

Exp. avec la méthode des lambdas, il a pris 20 lambdas. (Echec)

E) Cas du solide

Solide caractérisé par module d'Young E. vec(F) = E*Delta L/L * S * vec(e_x)

Avec PFD on peut remonter à une eq. De D'Alembert aussi où c=sqrt(E/rho)

II/ Aspects énergétiques

A) Impédance, grandeurs couplées

Impédance caractérise la réponse d'un système à une excitation et relie deux grandeurs. Ici par exemple p et v tel que p1=Z*v1.
En considérant OPPH et d'Alembert, on montre que Z = rho_0 *c = sqrt(rho_0 / X_0)

B) Vecteur de Poynting.

On part de dP = dF*v, en intégrant on a P = int_S p1*v1*dS = int_S Pi * dS avec Pi = p1*v1 le vecteur de Poynting.

C) Equation énergétique locale

Traité très rapidement, on multiplie les Eq. 1 et 2 pour faire apparaître une équation de conservation de la densité énergétique, qui vaut e(x,t) = 1/2 * X_0 * p_1^2 + 1/2*rho_0 * v_1^2

D) Intensité acoustique

Non traitée.

Conclusion

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

Tu as commencé avec la vidéo du haut-parleur et du sable, en quoi ça fait un lien ?
On voit ce qu'on entend, la vibration du haut-parleur implique la géométrie de l'onde stationnaire.

Dans tes hypothèses tu as dit qu'il n'y avait pas de force extérieure (gravité), mais là il y a de la gravité, qu'est-ce que ça change ?
En fait c'est pas très important parce que la gravité provoque un gradient de pression statique qui compense la gravité.

Quels hypothèses on fait pour que p1 n'interagissent pas avec les variations de p_0 ?
Il faudrait que les tailles caractéristiques de variation de p_0 lié à la gravité soient très grande devant taille caractéristique de variation de p_1 (Erwan).

Sur tes hypothèses, $v_0 = 0$ et du coup on prend v_1 petit ? Si oui, petit par rapport à quoi ?
$v_1 < c$ → en pratique, ce n'est pas spécialement

Quand v_1 approche c il se passe quoi ? Ça s'appelle comment ?
Onde de choc (Rep d'Erwan) → je nuancerais un peu ma réponse, cela dépend aussi d'autres facteurs.

Quelques questions/remarques sur des confusions, des erreurs d'écriture (vecteurs, grandeurs en $_0$ ou $_1$, dérivées etc.)

Quand tu fais ta démonstration avec le PFD qui aboutit à l'Eq. D'onde, c'est le cas pour tous les systèmes ça ?
Dès qu'il n'y a pas de dissipation, à l'ordre 1, oui. + réversible et conservatif.
→ dans les cas où on a une propagation linéaire + ce sont les systèmes que l'on va généralement étudier à niveau agrég. Mais je serais précautionneux sur le fait d'y voir une trop grande universalité.

Ça veut dire quoi OPPH ? Ce capteur émet-il OPPH ?
Onde Plane (front d'onde en plan) Progressive (se propage) Harmonique (une seule fréquence). Ce n'est pas strictement une OPPH mais à cette distance, localement on peut faire l'approximation que c'est plan. → le front d'onde est localement plan, mais ce n'est pas une OPPH. On a notamment une décroissance de l'amplitude avec la distance.

Pourquoi 40 kHz et pas 500 Hz par exemple ?
Longueur d'onde serait beaucoup trop grande par rapport à notre mesure + l'émetteur marche à 40 kHz. Et il faut être assez loin de l'émetteur (structure d'onde plane valable en champ lointain).

Pourquoi observation temporelle ? Aurait-on pu faire autre observation ?
Oui, en XY par exemple et compter le nombre de fois où l'on passe d'une configuration en droite par exemple à la droite suivante (en passant par ellipse, circulaire etc.)

Pourquoi 20 périodes ?
Il en faut suffisamment pour réduire l'erreur mais pas trop puisqu'au delà c'est pénible déjà, et en plus d'autres erreurs seront de toute façon dominante.

Peux-tu réessayer la manip ?
Il l'a refait, il trouve une très bonne valeur, il avait oublié de compter un lambda tout à l'heure.

Pourquoi le signal baisse en intensité ? Pourquoi en 1/r
Sphère, énergie constante, intégrale de vecteur Poynting est constante sur une sphère centrée sur la source, la surface de la sphère évolue en $1/r^2$ donc amplitude en $1/r$

Pourquoi le choix de parler du solide ?
Parce que le titre est « Ondes acoustiques », pas [...]dans les fluides, donc ça rend la leçon plus complète, même si moins classique.

Commentaires lors de la correction de la leçon

Le jury insiste sur l'importance de la clarté et de la précision dans l'usage des notations et des concepts, notamment sur la distinction entre scalaires et vecteurs. Ils attendent une présentation impeccable, sans erreurs conceptuelles, notamment dans les transitions entre différentes sections de la présentation. L'explication des ondes dans les milieux solides a été bien reçue, mais il y a une suggestion d'inclure plus d'exemples pratiques pour illustrer les concepts abordés. De plus, le jury encourage à développer une introduction qui pose clairement la problématique et à maintenir une structure cohérente tout au long de la présentation pour mieux guider l'audience vers la conclusion. On peut notamment à penser à des exemples très concrets comme par exemple la problématique du son des instruments (flûte, trombone) en fonction de leur géométrie. Des erreurs mineures ont été notées, mais elles ne compromettent pas la qualité générale de la présentation. Le jury conclut que, malgré quelques petites erreurs, la présentation est claire et il y a une bonne marge pour une amélioration continue.