26 Février 2021

LP : Ondes acoustiques

Dihya SADI et Elio THELLIER

Figure 1: Merci à Charles Goulas d'être un sacré Charles Goulas <3

Contents

1 Introduction générale de la leçon **3**

2 Partie 1 : Equations fondamentales de l'acoustique **3**
2.1 Ondes sonores dans les fluides : approximation acoustique 3
2.1.1 Hypothèses 3
2.1.2 Equations constitutives 4
2.1.3 Equation d'onde 4
2.1.4 Célérité 5
2.2 Ondes sonores dans les solides 5
2.2.1 Célérité 6

3 Partie 2 : Grandeurs caractéristiques **7**
3.1 Densité energétique 7
3.2 Intensité acoustique et dB 7
3.2.1 Retour sur les hypothèses du modèle 8
3.3 Impédance acoustique 9
3.3.1 Application à l'onde plane 9
3.3.2 Propagation d'une onde plane à travers un dioptre 10

4 Partie 3 : Fonctionnement de l'oreille, adaptation d'impédance **10**

5 Ouvertures possibles, prolongements, et conclusion de la leçon **11**

6 Exercices de base et applications intéressantes pour la leçon **11**

7 Bibliographie pour construire la leçon **12**

8 Expériences illustratives, simulations numériques et exploitation **12**

9 Critique des choix pédagogiques de la leçon **12**

10 Questions et remarques globales **13**
10.1 Questions provenant des anciens rapports ou questions de culture potentielles sur le sujet 13
10.2 Questions correction étudiante (Blandine Chloé et Rebecca) 13
10.3 Questions et remarques correcteur (Manuel Combes) 14

1 Introduction générale de la leçon

On a tous une idée assez intuitive de ce que sont les ondes sonores, quand on parle à nos amis ou qu'on écoute de la musique : on a cette image d'une vibration de la membrane d'un haut parleur ou bien des cordes vocales qui vont mettre en mouvement les molécules de l'air, puis elles vont se pousser de proches et proches et c'est ainsi que l'onde va se propager ! Mais quel rapport avec les ondes sismiques par exemple, qui déforment les roches de la terre sur des km et des km ? Ou bien l'échographie qui permet de sonder ce qui se passe dans le ventre de la maman ? Eh bien tout ces phénomènes peuvent être décrits par les ondes acoustiques, domaine très large qui décrit le déplacement d'une perturbation dans les fluides comme dans les solides, avec des OG de fréquences ou d'intensité très larges.

2 Partie 1 : Equations fondamentales de l'acoustique

2.1 Ondes sonores dans les fluides : approximation acoustique

2.1.1 Hypothèses

On se donne un fluide dans un référentiel galiléen et dans un milieu continu et uniforme, décrit par les champs mésoscopiques usuels en méca flu, $P(M,t)$, $\mu(M,t)$ et $\vec{v}(M,t)$ avec les hypothèses suivantes :

- fluide parfait, compressible, irrotationnel et barotrope
- Pesanteur négligée
- Champs uniformes au repos P_0 μ_0 et $\vec{0}$
- Evolution isentropique (adia et réversible)

On se place dans l'approximation acoustique : l'onde sonore = faible perturbation de l'état de repos.

$$\mu(M,t) = \mu_0 + \delta\mu(M,t)$$

$$P(M,t) = P_0 + \delta P(M,t)$$

$$\vec{v}(M,t) = \vec{0} + \vec{v}(M,t)$$

On traite δP, $\delta\mu$, $\vec{v}$ et leurs dérivées comme des infiniment petits du 1er ordre.

2.1.2 Equations constitutives

- Equation d'Euler :

$$\mu(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}.\vec{grad})\vec{v}) = -\vec{grad}(P)$$

Après linéarisation à l'ordre 1 on obtient Euler linéarisée

$$\mu_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\vec{grad}(\delta P)$$

Insister ici sur le fait qu'on néglige la dérivée advective devant la dérivée temporelle parce qu'on est dans le cadre d'une approximation linéaire mais que c'est pas forcément évident et qu'on le vérifiera plus tard.

- Conservation de la masse :

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

Après linéarisation :

$$\frac{\partial(\delta\mu)}{\partial t} + \mu_0 div(\vec{v}) = 0$$

- Equation d'état :

On a un fluide barotrope (ligne d'égale pression = lignes d'égale densité) donc $\mu = f(P)$. On écrit un développement limité à l'ordre 1 :

$$\mu = \mu_0 + \left.\frac{d\mu}{dP}\right|_S (P - P_0)$$

Attention ici c'est à priori une dérivée particulaire qu'on a. On peut négliger sans problème la dérivée advective mais il faut le dire et pas le passer sous silence. Cela fait apparaître à une constante multiplicative près le coefficient de compressibilité isentrope χ_S et on obtient finalement :

$$\delta\mu = \mu_0 \chi_S \delta P$$

2.1.3 Equation d'onde

Détailler un peu : on applique div à Euler linéarisée puis en utilisant l'égalité de Schwarz puis en faisant intervenir la conservation de la masse linéarisée et enfin l'équation d'état proportionnelle on obtient :

$$\frac{\partial^2(\delta P)}{\partial t^2} = c^2 \Delta(\delta P)$$

avec

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

2.1.4 Célérité

- Air : on prends le modèle du gaz parfait, à partir de la loi de Laplace $P\mu^{-\gamma}$ on obtient $\chi_S = \frac{1}{\gamma P}$ puis en utilisant la loi des gaz parfaits :

  $$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

  Application numérique pour l'air : $c_{air} = 345$ m/s à 20 degrés

- Eau : $c_{eau} = 1470 m/s$ à 20 degrés

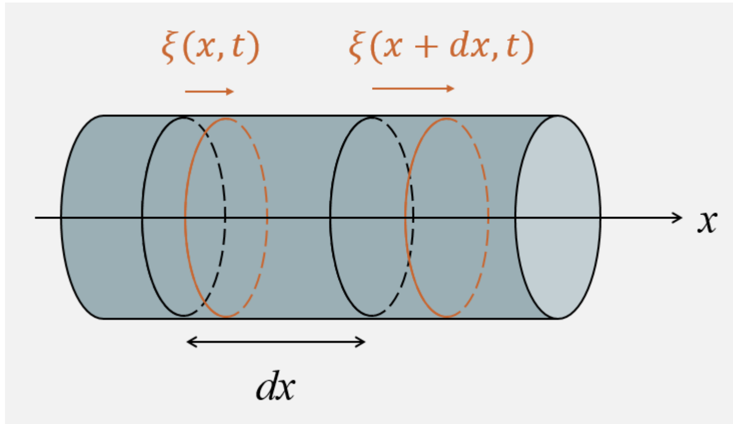
Transition : En fait notre "ressenti" du son ne passes pas uniquement par les conduits auditifs mais aussi à travers nos os, c'est l'ostéophonie. La légende dit que Beethoven, devenu sourd, utilisait une baguette coincée entre ses dents qui touchait également la caisse de son piano pour ressentir les vibrations à travers les os de sa mâchoire puis de son crâne ! Ce phénomène est aussi la raison pour laquelle notre voix nous paraît très différente dans les enregistrements par rapport à ce qu'on entends au quotidien : quand on parles les ondes sonores passent certes à travers notre conduit auditif, comme tous les autres sons qui proviennent de l'extérieur, mais aussi à travers les os de la mâchoire et du crâne, et on va voir que cette propagation dans les solides a des proprietés assez différentes !

2.2 Ondes sonores dans les solides

On va prendre le modèle 1D simplifié d'une barre solide de section fixe S. Cette barre est déformée par le passage d'une perturbation. On peut exprimer la force surfacique associée à cette déformation avec la loi de Hooke. Valable dans la limite d'élasticité du solide (ie déformation réversible) :

$$\frac{F}{S} = E\frac{\Delta L}{L}$$

On voit apparaître le module d'Young E, en Pa, ou module d'élasticité longitudinale, qui caractérise la déformabilité d'un solide. Plus il est grand moins le solide est compressible.



La loi de Hooke appliquée au système que l'on considère donne (en notant F la force dirigée de la droite vers la gauche):

$$F(x) = SE\frac{\xi(x+dx,t)-\xi(x,t)}{dx} = SE\frac{\partial \xi}{\partial x}$$

On applique le PFD à une tranche d'épaisseur dx :

$$\mu_0 Sdx\frac{\partial v}{\partial t} = F(x+dx,t) - F(x,t) = \frac{\partial F}{\partial x}dx$$

Après simplification en utilisant la loi de Hooke :

$$\frac{\partial^2(\xi)}{\partial t^2} = c^2\Delta(\xi)$$

avec

$$c = \sqrt{\frac{E}{\mu_0}}$$

2.2.1 Célérité

Quelques ordres de grandeur :

	Masse volumique μ_0 ($kg.m^{-3}$)	Module d'Young E (GPa)	Célérité (m/s)
Acier	7500	210	5291
Aluminium	2700	69	5055
Bois	930	12	3592
Caoutchouc	920	0,1	329
Verre	2500	69	5253

Remarque : son beaucoup plus rapide dans les métaux que dans l'air donc l'indien du western qui colle son oreille au rail avant l'assaut entends le train arriver plus vite.

Transition : Bon c'est bien d'avoir pu caractériser la propagation d'une onde sonore et estimer sa célérité mais quand on fabrique une source sonore, quand on a besoin d'établir des normes etc ce qui nous intéresse ça va être la puissance, l'énergie transportée par l'onde !

3 Partie 2 : Grandeurs caractéristiques

3.1 Densité energétique

Pour faire un bilan énergétique de la même manière qu'en élec on part des deux équations couplées sur les grandeurs couplées $\vec{v}$ et δP :

$$\mu_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{grad}(\delta P) = 0$$
$$\chi_S \frac{\partial \delta P}{\partial t} + div(\vec{v}) = 0$$

Puis on multiplie la première par $\vec{v}$ et la seconde par δP puis on les somme. On obtient :

$$\chi_S \frac{\partial \delta P}{\partial t} \delta P + \mu_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \vec{v} = -\vec{grad}(\delta P)\vec{v} - \delta P div(\vec{v})$$
$$\frac{\partial}{\partial t}(\frac{1}{2}\mu_0 v^2 + \frac{1}{2}\chi_S \delta P^2) = -div(\delta P \vec{v})$$

On voit apparaître la divergence du produit $\delta P \vec{v}$ que l'on va noter $\vec{\Pi}$, vecteur densité de flux de puissance, homogène à une puissance par unité de surface, appelé par analogie avec ce qu'on a vu en EM, vecteur de Poynting acoustique.

$e_c = \frac{1}{2}\mu_0 v^2$ est l'énergie cinétique volumique de l'écoulement.

$e_p = \frac{1}{2}\chi_S \delta P^2$ est une énergie potentielle élastique associée à la compression dilatation des particules de fluide.

On a finalement l'équation de conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial (e_c + e_p)}{\partial t} + div(\vec{\Pi}) = 0$$

3.2 Intensité acoustique et dB

Ordres de grandeur de puissance par unité de surface pour l'oreille humaine, au seuil d'audibilité et au seuil de douleur :

$$< \Pi >_{min} = 10^{-12} W.m^{-2}$$
$$< \Pi >_{max} \ 10 W.m^{-2}$$

13 décades entre la puissance minimale et maximale, c'est énorme ! L'oreille est un capteur logarithmique. On définit une échelle plus adaptée :

Intensité sonore :

$$I = 10log\frac{< \Pi >}{< \Pi >_{ref}}$$

avec $< \Pi >_{ref} = 10^{-12} W.m^{-2}$

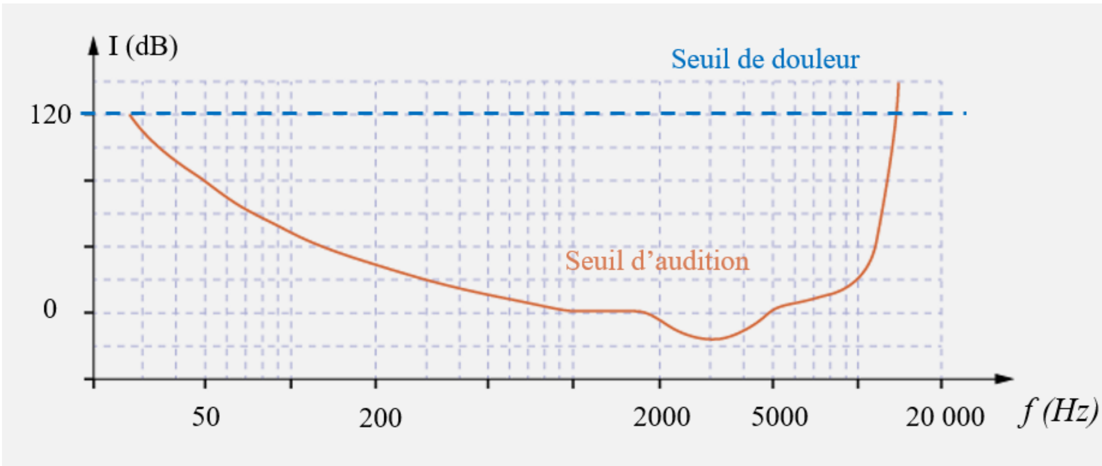


Figure 2: Diagramme de Bode de l'oreille

Quelques OG : pièce calme 40 dB, concert 100 dB, décollage d'un avion 110 dB...

3.2.1 Retour sur les hypothèses du modèle

Maintenant qu'on a définit l'intensité sonore c'est elle qui nous permet de tout chiffrer. On va pouvoir revenir sur les hypothèses simplificatrices du début.

- Négligence de la dérivé advective de la vitesse devant la dérivée temporelle (je crois pas que ça se dises mais on se comprends)

$$\left\|\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}\right\| << \left\|(\vec{v}.\vec{grad})\vec{v}\right\| \Leftrightarrow v << c$$

  Or pour une OPPH $v = \sqrt{\frac{2\Pi}{\mu_0 c}}$ donc pour par exemple un son d'intensité 50 dB dans l'air on a $v = 2.10^{-5}$ m/s donc l'hypothèse est largement vérifiée.

- Négligence de la pesanteur

$$\|\mu\vec{g}\| << \left\|\vec{grad}(\delta P)\right\| \Leftrightarrow \frac{\lambda g}{c^2} << 1 \Leftrightarrow f >> \frac{g}{c} = 7.10^{-3} Hz$$

  Hypothèse largement vérifiée pour des ondes sonores entre 20 Hz et 20 kHz.

- Adiabadicité

  Les échanges entre tranches de fluides se feraient par diffusion de chaleur. Or le temps caractéristique de diffusion s'écrit $L_{diff} = \sqrt{D_{th}\frac{1}{f}}$ et on peut effectivement négliger ce phénomène si $L_{diff} << \lambda$ ie $f << \frac{c^2}{D_{th}} = 10^{13} Hz$ ce qui est largement réalisé encore une fois pour des ondes sonores.

- Approximation acoustique et linéarisations à l'ordre 1 :

  Pour une OPPH d'intensité 50 dB dans l'air on a d'après le même calcul que plus haut en utilisant la valeur de l'impédance de l'air (400 $Pa.s.m^{-1}$) $\delta P = 10^{-2} Pa$, ainsi :

$$\frac{\delta P}{P_0} = \frac{10^{-2}}{101325} = 9,8.10^{-8} << 1$$

$$\frac{\delta \mu}{\mu_0} = \delta P \chi_S = 2,2.10^{-5} << 1$$

3.3 Impédance acoustique

Par analogie avec l'électricité on définit l'impédance acoustique comme le rapport des grandeurs couplées, rapport de la cause (surpression) sur la conséquence (un flux, ici une vitesse)

$$Z = \frac{\delta P}{\vec{v}.\vec{n}}$$

Insister ici sur le signe qu'on met en général à la main : il faut un moins pour des ondes contra-propageantes.

3.3.1 Application à l'onde plane

La solution la plus simple de l'équation d'Alembert est la solution en onde plane progressive harmonique. Or on voit bien que quand on parles généralement le son émis est isotrope. La description en ondes sphériques serait donc plus adéquate. Toutefois un calcul rapide montrerait qu'en champ lointain (c'est à dire pour $kr >> 1$ ie $r >> \frac{c}{2\pi f}$ ie pour un son de fréquence de l'ordre du kHz il suffit d'avoir $r >> 0.05$ m ce qui est peu contraignant) on retrouve une structure d'onde plane pour l'onde donc le modèle de l'onde plane est plutôt une bonne description de ce qu'il se passes d'où son intérêt.

On considères ainsi une onde plane progressive de surpression :

$$\delta P(M,t) = P_0 e^{i(\omega t - kx)}$$

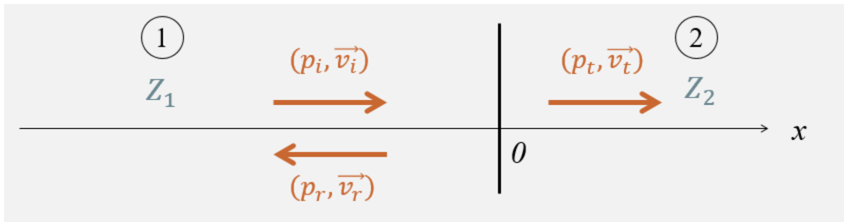
En utilisant Euler linéarisée :

$$\mu_0 i\omega \vec{v} = ik$$

Finalement :

$$Z = \mu_0 c$$

3.3.2 Propagation d'une onde plane à travers un dioptre



Calcul sur diapo, on obtient des coefficients de réflexion et transmission en intensité :

$$T_I = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2}$$
$$R_I = \frac{(Z_1-Z_2)^2}{(Z_1+Z_2)^2}$$

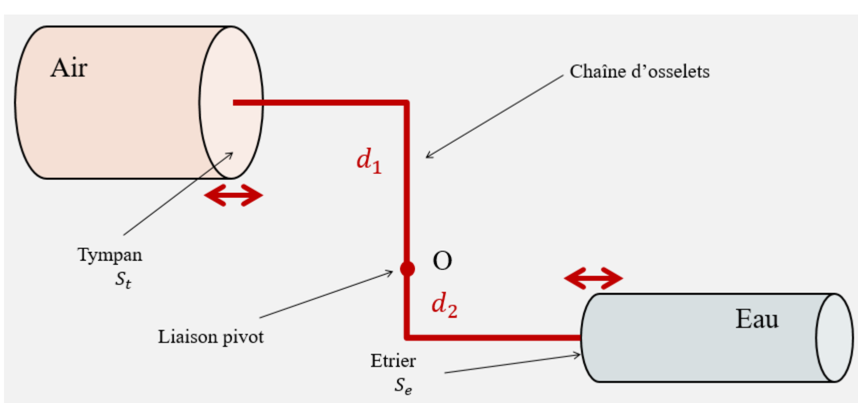
4 Partie 3 : Fonctionnement de l'oreille, adaptation d'impédance

A grande distance d'une source sonore on a vu qu'on pouvait modéliser l'onde émise par une onde plane. Elle arrive au niveau du tympan qui en vibrant transmet l'onde aux liquides cochléaires, assimilables à de l'eau.

Problème : $Z_{air} = 400 Pa.s.m^{-1}$ et $Z_{eau} = 1,5.10^6 Pa.s.m^{-1}$ donc le facteur de transmission en intensité est $T_I = 1,1.10^{-3} << 1$: la transmission se fait très mal. La chute de niveau acoustique est de $\Delta I_{dB} = 10 log \frac{\Pi_t}{\Pi_i} = 10log(T) = -30dB$.

Solution : Adaptation d'impédance par les osselets

Chaîne d'osselet qui transmet la vibration mécaniquement en conservant l'information sur l'amplitude et la fréquence.



On applique le TMC par rapport à l'axe de la liaison pivot :

$$F_1 d_1 = F_2 d_2$$
$$p_1 S_t d_1 = p_2 S_e d_2$$
$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{S_t d_1}{S_e d_2} = 26$$
$$\Delta I_{dB} = 10 log \frac{p_2^2}{p_1^1} = 20 log(26) = 28 dB$$

Ainsi grâce à la présence des osselets on peut entendre dans des conditions raisonnables. De plus existence de ce qu'on appelle le réflexe stapédien : si l'intensité sonore entrante est trop grande les osselets se rigidifient et ne transmettent plus la vibration mécanique : on perds à nouveau les 28 dB.

5 Ouvertures possibles, prolongements, et conclusion de la leçon

En conlusion avec le modèle de l'approximation acoustique on a pu décrire de manière satisfaisante plusieurs phénomènes d'ondes acoustiques. Modèle marche vraiment très bien. Toutefois pas suffisant pour décrire des effets non linéaires mettant en jeu des ondes sonores de très fortes intensité tels que le phénomène de lévitation acoustique, de plus en plus utilisé dans l'industrie car peut mettre en mouvement des objets non conducteurs. A l'heure actuelle on n'est capable de déplacer que quelques milligrammes mais c'est encore en travaux et l'idée ce serait de l'utiliser dans les milieux pharmaceutiques !

6 Exercices de base et applications intéressantes pour la leçon

A la place de l'adaptation d'impédance on aurait pu choisir de parler du modèle de la sphère pulsante (je l'avais prévu mais je me suis rendue compte que je n'aurais jamais le temps) et il y a des résultats plutôt intéressants. J'avais prévu de faire :

- Résolution de l'équation d'onde pour un champ de surpression sphérique isotrope
- Calcul de la vitesse : apparition de deux termes, l'un dominant en champ proche l'autre en champ lointain, le second ayant exactement une structure d'onde plane
- Modèle de la sphère pulsante, parois qui vibrent en $ae^{i\omega t}$ calcul de l'intensité sonore associée et calcul de l'amplitude a de vibration de la membrane pour produire un son de fréquence 50 Hz à 1 distance de 1m avec une intensite de 80 dB

- Calcul de la puissance moyenne transportée, indépendante de r, on retrouve le fait que des sources sonores de petites tailles ne sont pas aptes à générer des basses fréquences

Autre idée : traiter le pavillon exponentiel pour l'adaptation d'impédance au niveau de l'oreille, cf centrale PSI 2011

7 Bibliographie pour construire la leçon

- Poly de JBM sur l'Acoustique
- Mon cours de prépa...
- Garing Ondes
- Centrale Physique 1 PC 2015

Quelques vidéos :

- Sur la lévitation acoustique
- Sur le fonctionnement de l'oreille moyenne 1
- Sur le fonctionnement de l'oreille moyenne 2

8 Expériences illustratives, simulations numériques et exploitation

On aurait pu faire une leçon orientée musique et ponctuer la leçon de petits concerts de didjeridoo pour illustrer ! Ca a été fait une année précédente apparemment.

9 Critique des choix pédagogiques de la leçon

Remarques importantes provenant des rapports de Jury :

- Ne pas se contenter d'évoquer les ondes sonores dans les fluides, mais aussi parler des solides
- De la même manière ne pas se limiter aux OPPH : le modèle de la sphère pulsante est apparemment attendu
- Aspect energétique très attendu aussi, il faut dégager un Poynting acoustique etc
- Insister beaucoup sur les applications physique
- Bien dégager l'approximation acoustique

- Insister sur l'aspect physique et microscopique
- De manière générale, une fois l'approximation acoustique, l'établissement de l'équation d'onde, et l'aspect énergétiques intégrés à la leçon, il y a énormément de choix possibles d'illustration donc se faire plaisir !

10 Questions et remarques globales

10.1 Questions provenant des anciens rapports ou questions de culture potentielles sur le sujet

- Que sont les mirages acoustiques ?
- Ondes transverses existent-elles ? Oui, dans les milieux stratifiés ! Cf épreuve A de 2014 sur les ondes acoustiques sous-marines.
- Limites du modèle de l'acoustique linéaire ? Ne suffit pas à expliquer le phénomène de lévitation acoustique (très intéressant d'ailleurs) qui est dû à des effets de non linéarités des ondes sonores intenses. Utilisé dans l'industrie pour déplacement d'objet de manière contrôlée, et ce même pour des matériau non conducteurs, ce qui n'est pas permis par la levitation EM.
- Est-ce qu'on a toujours $c_{gaz} < c_{liq} < c_{sol}$? Non, cas particuliers comme le chloroforme ou le dihydrogène.
- Grosse différence entre propagation dans les fluides et solides ? Dans les fluides l'onde se propage grâce à une variation de pression tandis que dans les solides le son se propage grâce à la vibration des atomes autour de leur position d'équilibre.
- Pourquoi on n'a pas d'ondes transverses dans les fluides ? Car tenseur des contraintes isotrope ?? En fait on a des ondes de cisaillement elles sont seulement très vite attenuées.
- Causes d'amortissement du son ? Absorption par relaxation moléculaire, par viscosité, ou par conduction thermique (échange de chaleur entre les tranches) change simplement l'équation de dispersion. Il y a un exercice dans le Garing à ce sujet, ça se fait très bien.

10.2 Questions correction étudiante (Blandine Chloé et Rebecca)

- Quelles sont les hypothèses de la loi de Hooke ? C'est une loi phénoménologique qui fonctionne très bien dans le domaine d'élasticité du solide (c'est à dire le domaine dans lequel après déformation le solide revient dans sa position initiale)
- Est-ce qu'on parles d'ondes longitudinales ou transversales ? Est-ce que les deux existent ? Oui les deux existent, dans les solides comme dans les fluides. Par exemple les ondes S sont des ondes sismiques de cisaillement. Dans les fluides les ondes de cisaillement existent aussi mais elles sont très vite attenuées.

- Pour revenir à l'indien qui met son oreille sur les rails... J'ai dit qu'on avait moins de dissipation dans le métal que dans l'air... En fait l'atténuation des sons a rien à voir avec la dissipation due à la viscosité de l'air. Cet effet là est vraiment très faible. En fait l'atténuation des sons avec la distance est due à la dilution sphérique (en 1/r). Donc finalement l'intérêt du rail en terme de dissipation d'énergie c'est surtout que du fait de son rapport d'aspect il guide l'onde et evite la perte en 1/r de l'onde sphérique.

- Qu'est ce qui caractérise la compressibilité d'un solide ? Equivalence entre le χ_S et le module d'Young ! Tous les deux caractérisent la compressibilité du milieu. Finalement les formules des célérités sont très semblables.

- Comment fonctionne la lévitation acoustique ? On créé des ondes acoustiques stationnaires verticales d'intensité très forte et on place l'objet au dessus d'un ventre de pression et en dessous d'un noeuds, et en moyenne on voit un gradient de pression tellement fort qu'il compense le poids suffisamment pour mettre l'objet en lévitation.

- Comment fonctionne l'échographie ? On envoie une onde acoustique ultrasonore (longueur d'onde de l'ordre du mm pour éviter la diffraction sur les organes) puis réflexion sur le bébé et d'après les distances de parcours on peut cartographier ce qui se passes dans le bidon !

- Pourquoi on applique un gel ? Le contact entre la sonde et la peau n'est pas parfait, il y a à priori une fine couche d'air or si on fait le calcul du coefficient de transmission en intensité air/peau, on trouve qu'il est très faible (10^{-3}), d'où l'application d'un gel avec une impédance acoustique très proche de celle de la peau.

10.3 Questions et remarques correcteur (Manuel Combes)

- Autre utilisation des ondes acoustiques en medecine ? On peut détruire des caillots de calcium responsables de cancers de la prostate en focalisant des ondes acoustiques dessus.

- Comment on focalise ? Eh bien comme en optique il existe des lentilles acoustiques. Parcontre elles devraient avoir des tailles de l'ordre du mètre... Il y a une autre technique utilisée notamment pour les échographies : l'émetteur est constitué d'une barrettes de plein de petits émetteurs dont on pilote le déphasage pour focaliser à telle ou telle profondeur.

- Revenir sur l'équivalence acoustique/optique que j'ai évoqué ? A partir du moment ou on met en évidence les coefficients de réflexion et transmission au niveau d'un dioptre on peut poursuivre l'analogie plus loin, écrire des lois de Descartes de l'acoustique etc. L'équivalent de l'indice optique n est l'impédance acoustique Z.

- Phénomène de mirage acoustique ? Un gradient de célérité implique un gradient d'impédance Z et la trajectoire de l'onde sonore est donc incurvée vers les zones ou la vitesse du son est la plus faible. Or dans les fluides la célérité (et donc l'impédance) augmente avec la température T et la pression P. Dans les océans, avec la profondeur T diminue mais P augmente. Du coup il existe une certaine profondeur à laquelle tout cela se compense et on a une valeur minimale de la célérité des ondes sonores ! C'est le canal SOFAR situé à environ 1000 m de profondeur. Si une baleine par exemple émet à cette profondeur toutes les ondes vont être incurvées de sorte à être "canalisées" et ça va fonctionner comme un guide d'onde (cf petit schéma) de sorte que les ondes vont pouvoir se propager sur de très grandes distances ! Utilisé aussi par les sous marins pour se cacher des sonars : il suffit de se mettre en dessous de cette ligne, car alors toutes les ondes arrivant de la surface de l'eau, à moins qu'elles soient exactement au dessus du sous marin et donc arriver normalement au dioptre, vont être courbées et jamais atteindre le sous-marin. Remarque : on a le même phénomène dans l'air...

- Comment on définit l'impédance ? On peut voir ça comme un rapport des causes sur les conséquences !

- Pourquoi dans les concerts on entends via le squelette ? Via le sol puis adaptation d'impédance par les chaussures !

- Célérité des ondes sismiques ? Ondes S et P entre 5 et 10 km/s. Si il y a des gradients de température ou de quoique ce soit d'autre qui font diminuer ou augmenter la célérité au cours du trajet ça donne un indice pour savoir si on est passé par un milieu plus chaud et donc plus compressible ou quoi et donc de supers infos sur ce qui se passe dans la croûte terrestre.

- Attention dans le DL1 pour l'équation d'état barotrope, c'est la dérivée particulaire qu'il faut écrire, et ensuite on néglige la dérivée advective, mais il faut au moins le dire.

- Dans cette leçon il faut ABSOLUMENT bien prendre le temps de vérifier les hypothèses de l'approximation acoustique parce que aussi grossières paraissent-elles elles fonctionnent en fait vraiment très bien ce qu'il est important de souligner !!!

- L'atténuation de l'onde par les phénomènes visqueux est très négligeable. Calcul faisable cf Garing, on obtient simplement une relation de dispersion plus compliquée, et les conclusions sont que pour un son d'1 kHz on a attenuation sur 130 km et sur 1,3 km pour une onde de 10 kHz donc vraiment c'est négligeable. D'ailleurs OG assez marrant : c'est pour ça que quand il y a la fête du village dans les parages c'est les basses qu'on entends et pas les aigus. Ils ont été attenués.

- Surtout pour les solides ne pas traiter le modèle de la chaîne d'atomes c'est super long et ça n'apporte rien de plus à la leçon. Simplement la loi de Hooke et un PFD c'est très bien déjà.

- Attention à la continuité de $\vec{v}.\vec{n}$ et p à l'interface parce que c'est pas si évident que ça. Pour la vitesse ok on n'a pas d'interpénétration on comprends mais pour la pression c'est pas toujours le cas. Moi j'ai fait une interface entre deux fluides, il y a pas de paroi mécanique entre les 2, donc interface sans masse il y a continué de P mais si il y a une masse il faut faire un PFD sur l'interface et on voit bien qu'il y a une différence de pression entre la droite et la gauche.

- Pourquoi trombone plus bruyant qu'une flûte ? Cornet fait une adaptation d'impédance. Modèle du pavillon exponentiel dans le Garing ou bien Centrale PSI 2011.