Leçon de Physique n°14
Ondes acoustiques

Niveau : CPGE 2ème année

Programme :

Notions et contenus	Capacités exigibles
Équation d'onde pour des ondes transversales sur une corde vibrante infiniment souple dans l'approximation des petits mouvements transverses.	Établir l'équation d'onde en utilisant un système infinitésimal.
Modèle microscopique de solide élastique unidimensionnel (chaîne d'atomes élastiquement liés) : loi de Hooke.	Relier la raideur des ressorts fictifs à l'énergie de liaison et évaluer l'ordre de grandeur du module d'Young.
Ondes acoustiques longitudinales dans une tige solide dans l'approximation des milieux continus.	Établir l'équation d'onde en utilisant un système infinitésimal.
1.2. Ondes acoustiques dans les fluides	
Mise en équations eulérienne des ondes acoustiques dans le cadre de l'approximation acoustique. Équation de d'Alembert pour la surpression.	Classifier les ondes acoustiques par domaines fréquentiels. Valider l'approximation acoustique en manipulant des ordres de grandeur. Écrire le système des trois équations locales utiles. Linéariser les équations et établir l'équation de propagation de la surpression dans une situation unidimensionnelle en coordonnées cartésiennes. Utiliser sa généralisation admise en faisant appel à l'opérateur laplacien.
Structure des ondes planes progressives harmoniques : caractère longitudinal, impédance acoustique.	Utiliser le principe de superposition des ondes planes progressives harmoniques. Utiliser la notion d'impédance acoustique.
Densité volumique d'énergie acoustique, vecteur densité de courant énergétique. Intensité acoustique.	Utiliser les expressions admises du vecteur-densité de courant énergétique et de la densité volumique d'énergie associés à la propagation de l'onde. Utiliser la notion d'intensité acoustique en décibel et citer quelques ordres de grandeur.
Ondes acoustiques sphériques harmoniques.	Utiliser une expression fournie de la surpression pour interpréter par un argument énergétique la décroissance en 1/r de l'amplitude.
Effet Doppler longitudinal	**Décrire et mettre en œuvre un protocole de détection « synchrone » pour mesurer une vitesse par décalage Doppler**
3. Interfaces entre deux milieux Réflexion, transmission d'une onde acoustique plane progressive sous incidence normale sur une interface plane infinie entre deux fluides : coefficients de réflexion et de transmission en amplitude des vitesses, des surpressions et des puissances acoustiques surfaciques moyennes.	Expliciter des conditions aux limites à une interface. Établir les expressions des coefficients de transmission et de réflexion. Associer l'adaptation des impédances au transfert maximum de puissance.

Livres : Tout-en-un DUNOD PC, Ondes H Prépa, Perez mécanique

Pré-requis : ondes progressives, ondes stationnaires, équation de d'Alembert, mécanique des fluides

I) Ondes dans les solides (A : vibration de phonons, B : Module d'Young, C : système continu) ; II) Ondes dans les fluides (A : Description lagrangienne, B : Hypothèse sur la transformation thermodynamique, C : célérité du son) ; III) Réflexion et Transmission des ondes sur les interfaces

Intro : *H Prépa*
Fin : L'étude des ondes sonore, **et plus largement des ondes acoustiques,** nous permet d'aborder un phénomène de propagation tridimensionnel. Dans cette leçon nous aborderons tout d'abord la propagation unidimensionnelle des ondes acoustiques dans les solides puis la propagation tridimensionnelle dans les fluides.

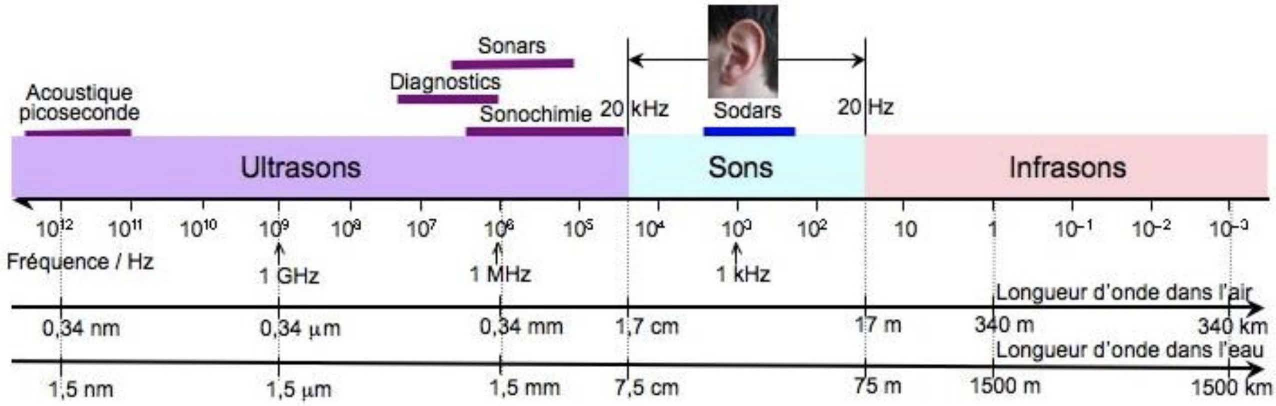

Figure pour classifier les ondes acoustiques par domaines fréquentiels.
Expérience introductive sur la nécessité du milieu matériel avec cloche à vide ? Pour justifier la nécessité d'un milieu matériel pour la propagation.

I – Ondes acoustiques dans les solides *Tout-en-un PC DUNOD*

La disposition des atomes dans un solide peut être modélisée par des points matériels Ai identiques, de masse m, reliés par des ressorts, tous identiques également, de raideur k et de longueur à vide l_0. Cette modélisation permet d'étudier la propagation d'ondes élastiques dans un réseau cristallin simple. Les travaux en la matière datent du milieu du XIX^e siècle, il sont dus principalement à Baden-Powell (1841) et à Lord Kelvin (1881).'
Le ressort modélise l'interaction entre deux atomes voisins. Pour comprendre la signification physique de la raideur k, nous allons tout d'abord nous intéresser aux propriétés élastiques du solide avant d'étudier la propagation des ondes acoustiques dans les solides.

1) Solides élastiques et module d'Young *Tout-en-un PC DUNOD*
Approche macroscopique :
Schéma de la tige soumise à une force de traction, courbe donnant la contrainte en fonction du taux d'allongement => défini la zone d'élasticité.
Définir le module d'Young E dans la zone d'élasticité : $\Delta L/L = 1/E\ F/S$
E homogène à une pression (s'exprime en Pa ou en $N.m^{-2}$)

Modèle microscopique :
Supposons que les atomes forment un réseau cubique simple de paramètre de maille égal
à a. Pour simplifier le raisonnement, on suppose que les ressorts ne se déforment que dans la direction d'application de la force et qu'il n'y a aucune contraction dans les directions perpendiculaires à cette force (Cf. figure 25.6).

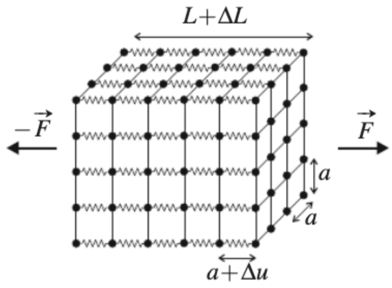

Figure 25.6 – Échantillon cubique

Définir $\Delta L/L$ à partir de l'allongement des ressorts
Faire le lien entre la force subie par un atome sur les surfaces droite et gauche et les forces F appliquées sur ces surfaces => E=k/a.
Energie de liaison W entre 2 atomes (W≈ qq eV) assimilée à l'énergie élastique du ressort
=> $W=\frac{1}{2}ka^2=\frac{1}{2}Ea^3$
Distance interatomique ≈ qq 0,1 nm
=> $E\approx 10^{-19}/10^{-30}=10^{11}$Pa
Pour le métal fer, $E\approx 190\times 10^9$Pa.

<u>2) Ondes de déformations longitudinales</u> *Tout-en-un PC DUNOD*
On étudie les petits mouvements de déformation le long de l'axe horizontal Ox d'une tige solide de section S (perpendiculairement à l'axe Ox) et de masse volumique μ_0.
À l'instant t, un plan d'abscisse x au repos se trouve à l'abscisse $x+\xi(x,t)$. On néglige tout effet lié à la pesanteur.
Dans le domaine d'élasticité du matériau, la force de traction T permettant à la lame de section S et de longueur L de s'allonger de ΔL est donnée par la loi de Hooke :
$T = ES\Delta L/L$ où E est le module d'Young du matériau.

On choisit dx petit devant la distance caractéristique de variation de $\xi(x,t)$.
Système : {tranche qui se trouve entre les plans d'abscisses x et x+dx, de masse $dm=\mu_0 Sdx$}
Allongement de cette tranche : $\xi(x+dx,t)-\xi(x,t)$

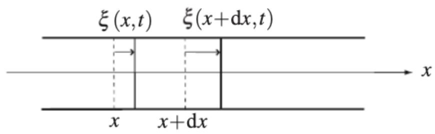

Figure 25.7 – Déformation de la lame.

=> allongement relatif : $(\xi(x+dx,t)-\xi(x,t))/dx\approx\partial\xi(x,t)/\partial x$ au 1er ordre en dx.
Force de traction exercée par la partie droite sur la partie gauche dirigée dans le sens positif de l'axe Ox si le matériau est allongé c'est-à-dire si $\partial\xi/\partial x>0$
=> $\mathbf{T}(x,t)=ES\partial\xi(x,t)/\partial x\ \mathbf{u_x}$ d'après la loi de Hooke, dans le domaine d'élasticité du matériau.
PFD : $dm\partial^2\xi(x,t)/\partial t^2 = T(x+dx,t)-T(x,t) = \partial T(x,t)/\partial x\ dx$ au 1er ordre en dx
Remplacer T par son expression => $\partial^2\xi(x,t)/\partial t^2=E/\mu_0\ \partial^2\xi(x,t)/\partial x^2$
=> on retrouve une équation de d'Alembert à une dimension où $c=\sqrt{(E/\mu_0)}$ dont nous avons vu dans la leçon précédente la forme des solutions.
AN : dans le fer : $\mu_0=7,8\times 10^3$kg.m^{-3} et $E\approx 190\times 10^9$Pa => $c\approx 4,9\times 10^3$m.s^{-1} soit plus de 10 fois plus que dans l'air.
Donner les valeurs : *H Prépa ch. 4*

<u>II – Ondes acoustiques dans les fluides</u> *Tec&doc PC + Tout-en-un PC DUNOD*
<u>1) Mise en équation</u>
HP à l'entrée d'un tuyau qu'on appelle tuyau sonore qui va produire une surpression en faisant vibrer les molécules au contact avec sa membrane et qui va se propager de proche en proche → onde longitudinale
On suppose l'écoulement parfait et l'influence de la pesanteur négligée.
Au repos : P_0, ρ_0, T_0 et **v** (vitesse de déplacement d'une couche de fluide)

Sous l'effet de cette onde :
$\rho(M,t)=\rho_0+\rho_1(M,t)$: valeur au repos + écart en masse volumique, $\rho_1 << \rho_0$
$P(M,t)=P_0+p_1(M,t)$: valeur au repos + surpression, $p_1<<P_0$ (ex : $P_0\approx10^5$Pa et $p_1\approx$qq Pa)
v (M,t): vitesse de déplacement des tranches de fluides (à ne pas confondre avec la vitesse de propagation de l'onde)
$<\mathbf{v}>=\mathbf{0}$; $<\rho_1>=0$; $<p_1>=0$
=> 5 inconnues : $p_1(M,t)$, $\rho_1(M,t)$ et **v** (M,t) (3 composantes)
=> 5 champs scalaires à déterminer : nécessité de 5 équations scalaires :
- équations d'Euler fournit 3 équations scalaires
- conservation de la masse
- comportement thermodynamique

Approximation acoustique : les calculs sont menés à l'ordre 1 des ces infiniment petits (donc à chaque fois qu'on aura des produits du style $\rho_1 p_1$ ou des carrés => ordre 2) dans le but de linéariser ces équations *Tec&Doc*

*Equation d'Euler : $\rho\,(\partial\mathbf{v_1}/\partial t+(\mathbf{v_1}.\mathbf{grad})\mathbf{v_1}) = -\,\mathbf{grad}(P)$
$(\mathbf{v_1}.\mathbf{grad})\mathbf{v_1}$: ordre 2 => on va le négliger
$(\rho_0+\rho_1)(\partial\mathbf{v_1}/\partial t) = -\,\mathbf{grad}(P_0+p_1)$
$\rho_1(\partial\mathbf{v_1}/\partial t)$: ordre 2 => on va le négliger
$\mathbf{grad}(P_0)=0$ car P_0 est un champ scalaire uniforme
=> $\rho_0(\partial\mathbf{v_1}/\partial t) = -\,\mathbf{grad}(p_1)$ (1)

*Conservation de la masse : $\partial\rho/\partial t+\mathrm{div}(\rho\mathbf{v})=0$
=> $\partial\rho_1/\partial t+\mathrm{div}((\rho_0+\rho_1)\mathbf{v_1})=0$
$\rho_1.\mathbf{v}$: ordre 2 => on néglige
=>$\partial\rho_1/\partial t+\rho_0\,\mathrm{div}(\mathbf{v_1})=0$ (2)

*Comportement thermodynamique des particules de fluides au passage de l'onde sonore : on suppose qu'elles subissent des transformation adiabatiques et réversibles (n'ont pas le temps d'échanger du transfert thermique et réversibles car les vibrations sont très très faibles) :
$\chi_S= -\,1/V\ \partial V/\partial P)_S = 1/\rho\ \partial\rho/\partial P)_S$: coefficient intensif qui ne dépend pas de la quantité de matière.
mesure l'aptitude du fluide à se comprimer ou se dilater
$\chi_S\approx1/\rho_0\ (\rho(M,t)-\rho_0)/(P(M,t)-P_0)$
$\chi_S\approx\rho_1/(\rho_0 p_1)$ (3) : coefficient de compressibilité isentropique (=adiabatique réversible)

Valider l'approximation acoustique en manipulant des ordres de grandeur. *H Prépa*

2) Equation de d'Alembert pour les ondes acoustiques
$\Delta p_1=\mathrm{div}(\mathbf{grad}(p_1))$ => div(1) => $-\Delta p_1=\rho_0\,\partial\mathrm{div}(\mathbf{v})/\partial t$ (car coordonnées d'espace et de temps sont indépendantes donc on peut permuter)
avec (2) => $-\Delta p_1=-\partial^2\rho_1/\partial t^2$ avec (3) => $\Delta p_1 - \chi_S\rho_0\partial^2 p_1/\partial t^2=0$
$[\chi_S\rho_0]=T^2/L^2$ => $c=1/\sqrt{(\chi_S\rho_0)}$

Exemple pour les gaz parfait s : en utilisant la loi de Laplace PV^γ=cste => $\ln(P\rho^{-\gamma}$=cste') puis dériver et injecter dans l'expression de $\chi_S\approx1/(\gamma P_0)$ => $c=\sqrt{(\gamma RT/M)}$ en utilisant $PV=mRT/M$
AN : $\gamma\approx7/5$ pour l'air, M(air)=29g/mol => $c\approx340\,m.s^{-1}$
Autres valeurs : *H Prépa ch. 4*

Expérience : propagation libre des ultrasons Poly Montrouge OndesI pour mesurer la vitesse
Matériel : banc optique, émetteur + récepteur d'ultrasons, GBF, oscilloscope
Mesurer la longueur d'onde et en déduire c => c=λT=λ/f

III - Aspect énergétique et intensité sonore

1) Densité volumique d'énergie acoustique

« Utiliser les expressions admises de la densité volumique d'énergie associé à la propagation de l'onde. »

2) Vecteur densité de courant énergétique

« Utiliser les expressions admises du vecteur-densité de courant énergétique associé à la propagation de l'onde. »

3) Intensité acoustique

« Utiliser la notion d'intensité acoustique en décibel et citer quelques ordres de grandeur. »
Acoustique physiologique : cf. Perez méca
Pour obtenir une sensation de son 2 fois plus fort, il faut multiplier la pression acoustique par plus d'un ordre de grandeur : l'échelle de perception de l'oreille humaine est clairement logarithmique. Sur la base de cette constation, G. Bell (également inventeur du téléphone), proposa la définition d'une nouvelle unité d'intensité sonore plus adaptée à la perception auditive : le décibel. Unité définie à partir d'une intensité objective de référence $w_0=10^{-12}W.m^{-2}$ (correspondant environ à la plus faible puissance sonore perceptible – le « tic-tac » de montre). cf. *Ondes et vibration, Lefort, Dunod*

Analogies EM-Acoustique (réflexion, transmission, diffraction, interférences) sans entrer dans les détails des calculs ?

A mettre quelque part : Classifier les ondes acoustiques par domaines fréquentiels. Source ?`

Conclusion : Dans cette leçon, nous avons abordé la propagation des ondes sonores dans les solides et les fluides. Nous avons aussi vu l'aspect énergétique fait le lien avec l'intensité et la perception auditive.