Physique

TRAVAUX DIRIGES n°13

*PC/PC**

2024-2025

Thème : Ondes acoustiques

Mardi 19 mars 2024

PO202 – Propagation dans un tuyau cylindrique

On considère un fluide de masse volumique μ_0 au repos dans un tuyau cylindrique de section S constante. S'y propage une onde acoustique longitudinale le long de l'axe (Ox) du tuyau. On suppose le rayon R du tuyau petit devant la longueur d'onde ce qui permet de supposer que toutes les grandeurs sont uniformes sur la section du tube. La tranche de fluide qui se trouve entre les plans x et $x + dx$ au repos se trouve entre les tranches $x + \xi(x,t)$ et $x + dx + \xi(x+dx,t)$ en présence de l'onde acoustique.

1 – A l'aide de la conservation de la masse sur cette tranche de fluide, établir une relation entre μ_0, $\mu(x,t)$ (masse volumique en présence de l'onde) et $\frac{\partial \xi}{\partial x}$.

2 – Par un bilan de forces pressantes sur ce système, en déduire l'équation de propagation de l'onde acoustique dans le tuyau. Le coefficient de compressibilité χ_S est donné.

PO204 – Onde sonore dans l'air et dans l'eau

Deux ondes sonores, l'une dans l'air et l'autre dans l'eau, ont même intensité.

1 – Quel est le rapport de l'amplitude de pression de l'onde dans l'eau à celle de l'onde dans l'air.

2 – Quel est le rapport de leurs intensités si leurs amplitudes de pression sont égales ?

Données : Masses volumique : $\mu_{air} = 1{,}3$ kg.m^{-3} ; $\mu_{eau} = 1{,}0.10^3$ kg.m^{-3}

Coefficient de compressibilité isentropique : $\chi_{seau} = 5{,}0.10^{-10}$ Pa^{-1} ; $\chi_{sair} = 1{,}4.10^{-5}$ Pa^{-1}

Réponses : 1) $\frac{p_{1m,eau}}{p_{1m,air}} = \left(\frac{\chi_{S,air}\cdot\mu_{eau}}{\chi_{S,eau}\cdot\mu_{air}}\right)^{1/4} = 68$ 2) $\frac{I_{eau}}{I_{air}} = \left(\frac{\chi_{S,air}\cdot\mu_{eau}}{\chi_{S,eau}\cdot\mu_{air}}\right)^{1/2} = 4{,}6.10^3$

PO206 – Onde plane de pression et de déplacement. Niveau d'intensité

Une onde acoustique plane et harmonique a une fréquence $f = 500\ Hz$ et une amplitude de déplacement $\xi_{max} = 10\ nm$ dans l'air à $T = 293\ K$, $p_0 = 1{,}0\ bar$, $M = 29\ g.mol^{-1}$, $Z_a = 4{,}0.10^2\ kg.m^{-2}.s^{-1}$.

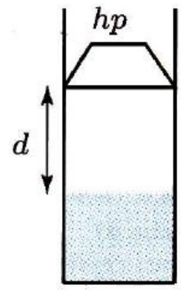
1 – Ecrire l'expression de l'onde de déplacement $\xi(x,t)$ puis celle de l'onde de pression $p_1(x,t)$ correspondante.

2 – Tracer sur le même graphe $\xi(x,t)$ et $p_1(x,t)$ à t fixé.

3 – Calculer le niveau sonore en dB

Réponses : 1)) $\xi(x,t) = \xi_{max}\cos\left(2\pi f\left(t - \frac{x}{c}\right)\right)$; $p_1 x,t) = \mu_0 c 2\pi f \xi_{max} \sin\left(2\pi f\left(t - \frac{x}{c}\right)\right)$ 3) $I_{dB} = 53$ dB

PO218 – Réflexion d'une onde sonore à la surface de l'eau *(Karl / Ariane)*



Un haut-parleur de fréquence $f = 3{,}0\ kHz$ est plongé dans un récipient contenant au fond de l'eau. Quand on fait varier d, on perçoit une amplification de l'onde tous les $\Delta d = 5{,}7\ cm$.

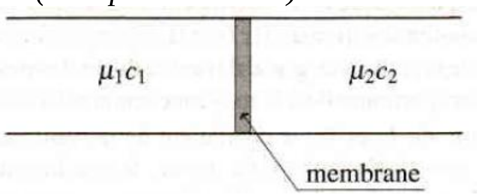
1 – Calculer le coefficient de réflexion en amplitude de la vitesse acoustique puis écrire l'expression de l'onde de vitesse dans l'air surmontant l'eau. Commenter.

2 – Expliquer l'amplification de l'onde et calculer la célérité du son dans l'air.

Données : $Z_{air} = 4{,}4.10^2\ Pa.s.m^{-1}$; $Z_{eau} = 1{,}4.10^6\ Pa.s.m^{-1}$.

PO214 – Réflexion – transmission d'onde sonore sur une membrane *(Théophane / Henri)*

La membrane de masse surfacique σ uniforme, située en $x = 0$, est supposée infiniment mince. Elle peut coulisser sans frottement dans le tuyau horizontal et sépare deux fluides parfaits. On note μ_i et c_i la masse volumique et la célérité des ondes acoustiques dans chacun des deux demi tuyaux ($i = 1$ ou 2). Le tuyau est supposé illimité.



Une onde incidente plane progressive monochromatique de pulsation ω d'amplitude de pression p_0 arrive sur la membrane.

1 – Déterminer les ondes de pression et de vitesse transmises et les ondes réfléchies en introduisant les coefficients de réflexion r et de transmission t pour l'onde de pression.

2 – Dans la suite, les deux milieux de part et d'autre de la membrane sont identiques.
Déterminer le coefficient r et t et le coefficient de transmission T en énergie, rapport des flux moyens d'énergie transmise et incidente.

3 – Tracer l'allure de la courbe $G_{dB} = 10.\log(T(\omega))$ en fonction de $\log(\omega)$. Quelles sont la nature du filtre, la fréquence de coupure f_c à $-3\ dB$ et la pente pour $f >> f_c$?

4 – On souhaite un affaiblissement de $40\ dB$ pour une fréquence de $200\ Hz$. Dans quel domaine se situe la fréquence de coupure f_c ? Commenter ?
En déduire la masse surfacique σ puis l'épaisseur a de la membrane sachant que sa masse volumique est $\rho = 1200\ kg.m^{-3}$. L'hypothèse d'une membrane infiniment fine est-elle vérifiée ?
On donne pour l'air : $\mu = 1{,}2\ kg.m^{-3}$; $c = 340\ m.s^{-1}$.

PO216 – Jonction entre deux tuyaux de sections différentes *(Enguerrand / Zoé)*

Un conduit cylindrique (C) de section S est rempli d'un gaz de masse volumique μ_0 dans lequel la célérité du son vaut c. On note Oz l'axe du cylindre, celui-ci se trouvant dans le demi-espace d'équation $z < 0$. Une onde sonore plane sinusoïdale s'y propage et a pour vecteur d'onde $\vec{k} = k.\vec{u_z}$, avec $k > 0$. Son champ de pression acoustique s'écrit $p(z,t) = p_0 \cos(\omega t - kz)$

1 – Donner les expressions de la fréquence ν de l'onde, de l'impédance acoustique Z du gaz se trouvant dans (C) et du champ de vitesse.

2 – On relie (C) à l'abscisse $z = 0$ à un autre cylindre (C') de même axe et de section S' rempli du même gaz.

2.1 – Déterminer les conditions aux limites que sont la continuité du débit et de la pression à la jonction entre les tuyaux en $z = 0$.

2.2 – En déduire les coefficients complexes de réflexion $\underline{\rho}$ et de transmission $\underline{\tau}$ des amplitudes des ondes réfléchie et transmise par cette surface pour la surpression en fonction du rapport $x = \frac{S'}{S}$. Conclure quant au déphasage des ondes réfléchie et transmise par rapport à l'onde incidente.

2.3 – Déterminer les expressions des coefficients énergétiques de réflexion R et de transmission T. Représenter graphiquement R en fonction de x et commenter.

2.4 – Quelle relation simple existe-t-il entre R et T ? Interpréter.

PO210 – Couche anti-reflet *(Paul)*

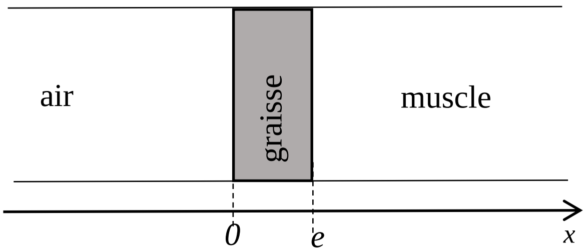
On donne les impédances des tissus musculaires $Z_m = 1{,}7.10^6\ kg.m^{-2}.s^{-1}$ et de l'air $Z_a = 4{,}0.10^2\ kg.m^{-2}.s^{-1}$.

1 – Calculer le coefficient de transmission de puissance sonore à une interface air-muscle et commenter.

2 – Pour supprimer l'onde réfléchie dans l'air, on réalise une couche anti-reflet d'épaisseur e en graisse, d'impédance Z_g . On note c_a, c_g, et c_m les célérités du son dans chacun des trois milieux, et on pose $k_a = \frac{\omega}{c_a}$, $k_g = \frac{\omega}{c_g}$ et $k_m = \frac{\omega}{c_m}$ les modules de vecteurs d'ondes respectifs.

On cherche alors en notation complexe des champs de vitesse dans les trois milieux :

$$\underline{v}(x<0) = \underline{v}_a = A_a.e^{j(\omega t - k_a.x)},$$
$$\underline{v}(0<x<e) = \underline{v}_g = A_g.e^{j(\omega t - k_g.x)} + B_g.e^{j(\omega t + k_g.x)}$$
$$\underline{v}(x>e) = \underline{v}_m = A_m.e^{j(\omega t - k_m.x)}$$



a - Justifier le choix du champ de vitesse.
b - Donner l'expression du champ de surpression dans chaque milieu.
c - Ecrire les conditions limites.
d - Etablir la relation : $\frac{Z_g - Z_a}{Z_g + Z_a} = \left(\frac{Z_g - Z_m}{Z_g + Z_m}\right) . e^{-2jk_g e}$. En déduire les valeurs pertinentes de Z_g et de e.

PO212 – Propagation d'une onde sonore dans un tuyau déformable *(Rim)*
Un tube horizontal de longueur infinie, cylindrique, d'axe (Ox), contient un fluide de masse volumique μ_0 et de compressibilité isentropique χ.
Le tube est élastique de section variable $S(x,t) = S_0 + S_1(x,t)$ où $S_1(x,t) << S_0$. On suppose que l'équation de comportement du tuyau permet de définir sa section comme fonction de pression uniquement, sous la forme $S = S(P)$.
On néglige les effets de la pesanteur et de la viscosité. On se place dans le cadre de l'approximation acoustique.
On définit la distensibilité :$D = \frac{1}{S}\frac{dS}{dP}$.
1 – Effectuer un bilan de matière pour le système ouvert compris entre les plans x et x + dx entre les instants t et $t + dt$. Linéariser cette équation et en déduire une relation entre $\frac{\partial p_1}{\partial t}$ et $\frac{\partial v}{\partial x}$ faisant intervenir le coefficient de compressibilité au repos χ_0 et la distensibilité D_0 au repos.
2 – En déduire l'équation de propagation des ondes sonores dans le tube et montrer que leur célérité est donnée par : $\frac{1}{c^2} = \mu_0(\chi_0 + D_0)$
3 – Application : la masse volumique et le compressibilité du sang et de l'eau sont comparables. Dans les conditions de l'expérience, la célérité du son dans l'eau vaut $c_{eau} = 1,4\ km.s^{-1}$. On donne
$D_{0m} = 1,0.10^{-11} Pa^{-1}$ pour un tuyau métallique et $D_{0v} = 4,0.10^{-5}\ Pa^{-1}$ pour un vaisseau sanguin.
Calculer c dans les deux cas. Commenter.
4 – On place en $x = 0$ une pompe assurant un débit massique $Q_m(t)$. En supposant qu'aucune onde ne provient de l'infini, déterminer l'expression de la vitesse $v(x,t)$ et de la surpression $p_1(x,t)$ du fluide sur le demi-axe $x > 0$ à l'aide de la fonction $Q_m(t)$.
5 – Le débit imposé par le cœur est de *4,5 L* par minute. Quel est l'ordre de grandeur de la surpression nécessaire pour assurer ce débit ? Le diamètre de l'aorte est de *10 mm* environ. Que se passe-t-il si la distensibilité des vaisseaux sanguins diminue (avec l'âge en général) ?

✮ PO208 – Pavillon acoustique exponentiel *(Raphaël)*
Un pavillon acoustique de longueur L présente une symétrie de révolution autour de l'axe (Ox). Son rayon est une fonction exponentielle croissante de x : $r(x) = r_0.e^{x/d}$.
On fait l'hypothèse que les ondes sonores qui s'établissent ne dépendent que de x et de t et que l'air est en moyenne au repos. En l'absence d'excitation, la pression est uniforme P_0, la température est uniforme T_0.
On note :
* $\xi(x,t)$ le déplacement longitudinal de la tranche d'air d'abscisse x au repos.
* $u(x,t)$ la vitesse de cette tranche d'air.
* $p(x,t)$ la surpression acoustique.
* $s(x)$ la section du pavillon à l'abscisse x

1 – Comment peut-on qualifier une onde de type $\xi(x,t)$? A quelle condition sur d la variation spatiale ne dépendant que de x est-elle une bonne approximation ?
2 – On assimile l'air à un gaz parfait, soit μ_0 sa masse volumique au repos à la température T_0 et à la pression P_0, et M sa masse molaire. Exprimer μ_0 en fonction de T_0, P_0 et de M.
Soit χ_S le coefficient de compressibilité isentropique de l'air, assimilé à un gaz parfait de coefficient isentropique γ. Exprimer χ_S en fonction de P_0 et de γ.
3 – En justifiant l'hypothèse isentropique établir une relation différentielle entre $p(x,t)$, $\xi(x,t)$ et $s(x)$.
4 – En appliquant le principe fondamental de la dynamique à la tranche d'air comprise entre x et $x + dx$, en déduire l'équation aux dérivées partielles (équation d'onde) vérifiée par $\xi(x,t)$.
Quelle forme prend cette équation si on fait tendre d vers l'infini ?
Définir la célérité de propagation des ondes sonores dans l'air et l'exprimer en fonction de χ_S et μ_0.