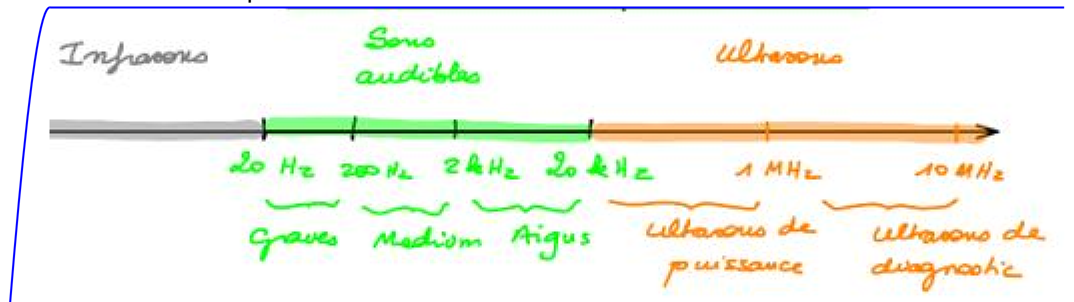
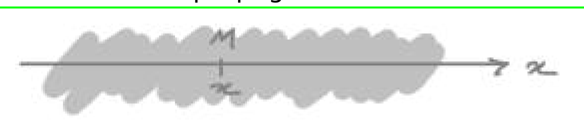
Ondes sonores dans les fluides

Domaines du spectre sonore



Modélisation de la propagation d'une onde sonore



Caractéristiques du milieu fluide

$\mu(x,t)$: masse volumique
$p(x,t)$: pression locale
$\vec{v}(x,t)$: vitesse locale (eulérienne)

Approximation acoustique

Approximation acoustique : le fluide est faiblement perturbé au passage de l'onde.

$$\boxed{\begin{aligned} \mu(x,t) &\simeq \mu_0 + \mu_1(x,t) \\ p(x,t) &\simeq p_0 + p_1(x,t) \\ \vec{v}(x,t) &\simeq \vec{0} + \vec{v}_1(x,t) \end{aligned}}$$

avec $\mu_1(x,t),\ p_1(x,t),\ \vec{v}_1(x,t)$ et leurs dérivées des infiniments petits d'ordre 1

L'approximation acoustique permet d'aboutir à des équations linéaires, elle est largement vérifiée pour des sons usuels.

Le passage de l'onde sera considéré comme une transformation **isentropique**.

Adiabatique : la longueur d'onde est très supérieure à la distance caractéristique de diffusion thermique.

$$\lambda >> \sqrt{DT} \text{ soit } f << \frac{v^2}{D} \sim 10^{10} \text{ Hz}$$

Réversible : changer t en $-t$ ne modifie pas les équations obenues dans le cadre de ce modèle.

Équation de d'Alembert pour la **surpression acoustique**

$$\boxed{\frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2}}$$

Coefficient de compressibilité isentropique

$$\chi_S = -\frac{1}{V}\left.\frac{\partial V}{\partial p}\right)_S$$

Célérité

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

Célérité dans différents milieux

Gaz parfait en évolution isentropique

$$\boxed{v = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}} \sim 340 \text{ m.s}^{-1}}$$

Liquide

$$\boxed{v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \chi_S}} \sim 1500 \text{ m.s}^{-1}}$$

Solide

$$\chi_S = \frac{1}{E} \text{ soit } \boxed{v = \sqrt{\frac{E}{\mu_0}}} \sim 5000 \text{ m.s}^{-1}$$

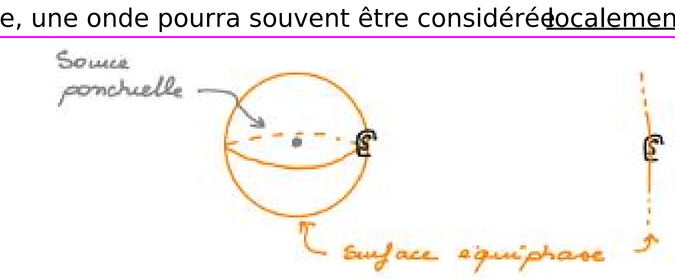
Surface d'onde

Surface d'onde : surface sur laquelle la surpression est la même à t fixé.

Modèle de l'onde propressive plane (OPP)

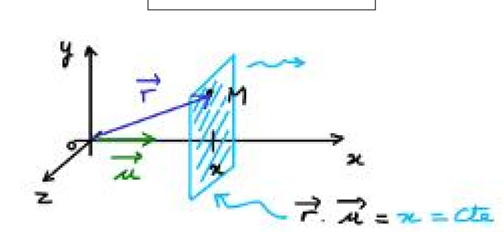
Onde plane : onde pour laquelle les surfaces d'onde sont des plans.

Loi de la source, une onde pourra souvent être considérée localement comme plane.



Structure d'une OPP

$$\boxed{p_1 = f(\vec{r} \cdot \vec{u} - vt)}$$



Vecteur position du point M d'observation
$\vec{r}$

Vecteur unitaire caractérisant la propagation
$\vec{u}$

La surpression acoustique est constante si
$\vec{r} \cdot \vec{u} = x = Cte$ (ce qui désigne un plan)

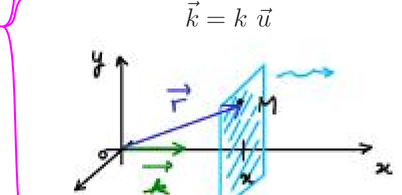
Onde progressive plane harmonique (OPPH)

$$\boxed{p_1 = A\cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi)}$$

$$\boxed{\underline{p_1} = A\ e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi)} = \underline{A}\ e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}}$$

Vecteur position du point M d'observation
$\vec{r}$

Vecteur d'onde
$\vec{k} = k\ \vec{u}$



Vecteur unitaire caractérisant la propagation
$\vec{u}$

Modèle de l'onde propressive sphérique (OPS)

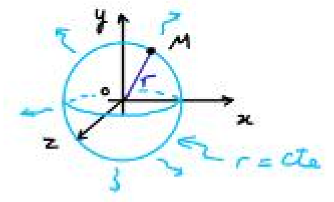
Onde sphérique : onde pour laquelle les surfaces d'onde sont des sphères.

Structure d'une OPP

$$\boxed{p_1 = \frac{1}{r}\ f(r \pm vt)}$$

Position du point M d'observation
r

La surpression acoustique est constante si
$r = Cte$ (ce qui désigne une sphère)



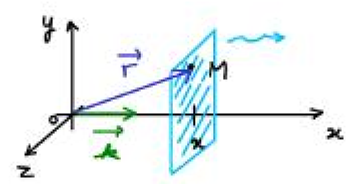
Onde progressive sphérique harmonique (OPSH)

$$\boxed{p_1 = \frac{A}{r}\cos(\omega t \pm kr + \varphi)}$$

$$\boxed{\underline{p_1} = \frac{\underline{A}}{r}\ e^{j(\omega t \pm kr)}}$$

Vecteur position du point M d'observation
$\vec{r}$

Vecteur d'onde
$\vec{k} = k\ \vec{u}$



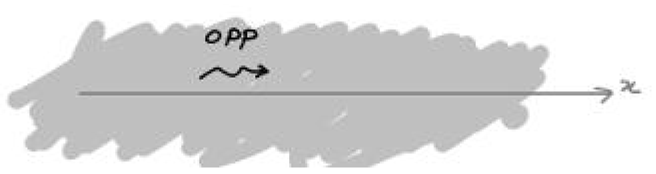
Vecteur unitaire caractérisant la propagation
$\vec{u}$

Impédance acoustique

$$Z_a = \frac{p_1}{v_1}$$

OPP se dirigeant vers les x croissants

$$\boxed{Z_a = \mu_0 v}$$



OPP se dirigeant vers les x décroissants

$$\boxed{Z_a = -\mu_0 v}$$

Dans une conduite

$$Z_a = \frac{p_1}{\phi_{v1}} = \frac{p_1}{\iint_S \vec{v}_1 \cdot \mathrm{d}\vec{S}}$$

Effet Doppler-Fizeau

Source s'approchant d'un récepteur

$$\lambda_R = \lambda_S - v_S T_S \text{ soit } \frac{v}{f_R} = \frac{v}{f_S} - \frac{v_S}{f_S}$$

$$\boxed{f_R = \frac{1}{1 - v_S/v} f_S}$$

La fréquence perçue est plus élevée.

Source s'éloignant d'un récepteur

$$\boxed{f_R = \frac{1}{1 + v_S/v} f_S}$$

La fréquence perçue est plus faible.

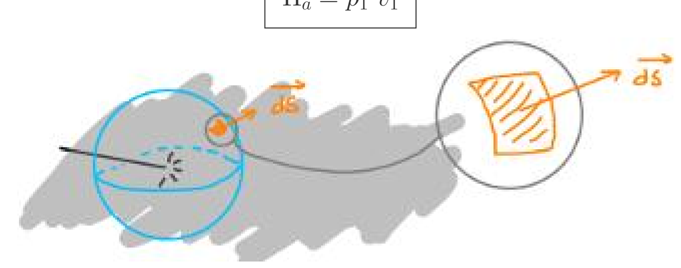
Aspects énergétiques

Vecteur **densité de courant énergétique**

$$\boxed{\vec{\Pi}_a = p_1\ \vec{v}_1}$$

Force de pression élémentaire
$\mathrm{d}\vec{F}_p = p_1\ \mathrm{d}\vec{S}$

Puissance élémentaire associée
$\mathrm{d}P_a = \mathrm{d}\vec{F}_p \cdot \vec{v}_1 = \vec{\Pi}_a \cdot \mathrm{d}\vec{S}$



Puissance acoustique rayonnée à travers une surface

$$\boxed{P_a = \iint_S \vec{\Pi}_a \cdot \mathrm{d}\vec{S}}$$

Équation locale de conservation de l'énergie acoustique

$$\boxed{\frac{\partial w_a}{\partial t} + \mathrm{div}\vec{\Pi}_a = 0}$$

Densité volumique d'énergie acoustique

$$\boxed{w_a = w_c + w_p = \frac{1}{2}\ \mu_0\ v_1^2 + \frac{1}{2}\ \chi_S\ p_1^2}$$

Intensité acoustique

$$\boxed{I =< ||\vec{\Pi}_a|| >=< p_1 v_1 >}$$

Pour une OPPH

$$I = \frac{p_{1,\max}^2}{2\mu_0 v}$$

Niveau sonore

$$\boxed{I_{\mathrm{dB}} = 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right)} \text{ avec } I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$$