

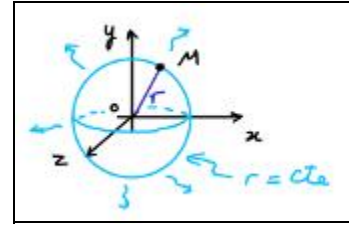
Onde sphérique : onde pour laquelle les surfaces d'onde sont des sphères.

Structure d'une OPP

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

Position du point M d'observation

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



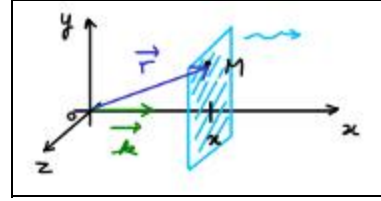
Modèle de l'onde progressive sphérique (OPS)

Vecteur position du point M d'observation

\vec{r}

Vecteur d'onde

$$\vec{k} = k \vec{u}$$



Onde progressive sphérique harmonique (OPSH)

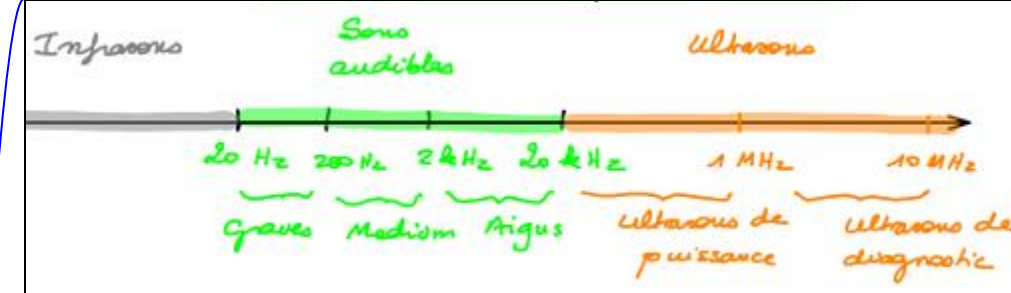
$$p_1 = \frac{A}{r} \cos(\omega t \pm kr + \varphi)$$

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

Vecteur unitaire caractérisant la propagation

\vec{u}

Domaines du spectre sonore



Caractéristiques du milieu fluide

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

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

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

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.

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

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

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

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

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

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

Coefficient de compressibilité isentropique

$$\chi_s = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_s$$

Célérité

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \chi_s}}$$

Gaz parfait en évolution isentropique

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

Liquide

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

Solide

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

Célérité dans différents milieux

Modélisation de la propagation d'une onde sonore



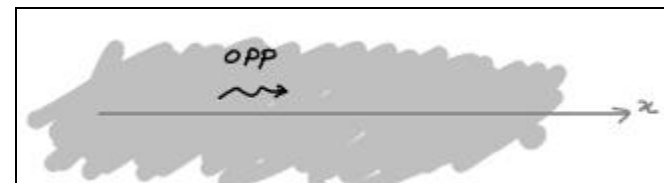
Ondes sonores dans les fluides

Impédance acoustique

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

OPP se dirigeant vers les x croissants

$$Z_a = \mu_0 v$$



OPP se dirigeant vers les x décroissants

$$Z_a = -\mu_0 v$$

Dans une conduite

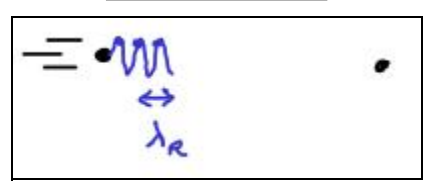
$$Z_a = \frac{p_1}{\phi_{v1}} = \frac{p_1}{\iint_S \vec{v}_1 \cdot d\vec{S}}$$

Source s'approchant d'un récepteur

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

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

La fréquence perçue est plus élevée.



Source s'éloignant d'un récepteur

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

La fréquence perçue est plus faible.

Effet Doppler-Fizeau

Vecteur **densité de courant énergétique**

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

Force de pression élémentaire

$$d\vec{F}_p = p_1 d\vec{S}$$

Puissance élémentaire associée

$$dP_a = d\vec{F}_p \cdot \vec{v}_1 = \vec{\Pi}_a \cdot d\vec{S}$$

Puissance acoustique rayonnée à travers une surface

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

Densité volumique d'énergie acoustique

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

Équation locale de conservation de l'énergie acoustique

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

Pour une OPPH

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

Intensité acoustique

$$I = \langle |\vec{\Pi}_a| \rangle = \langle |p_1 v_1| \rangle$$

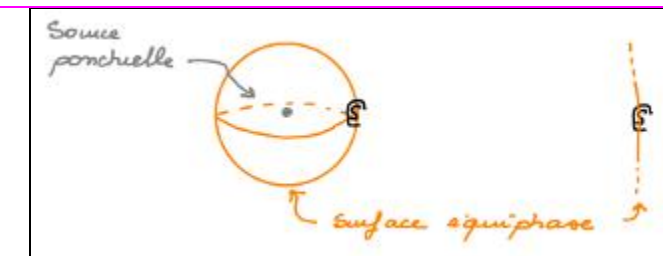
Niveau sonore

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

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

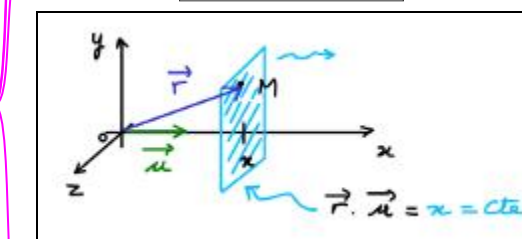
Onde plane : onde pour laquelle les surfaces d'onde sont des plans.

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



Structure d'une OPP

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



Modèle de l'onde progressive plane (OPP)

Vecteur position du point M d'observation

\vec{r}

Vecteur unitaire caractérisant la propagation

\vec{u}

La surpression acoustique est constante si

$$\vec{r} \cdot \vec{u} = x = Cte \text{ (ce qui désigne un plan)}$$

Onde progressive plane harmonique (OPPH)

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

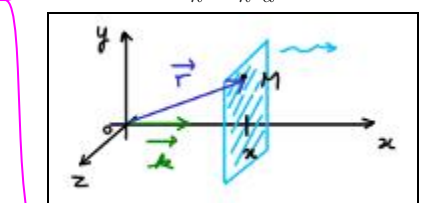
$$p_1 = A e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi)} = \underline{A} e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$$

Vecteur position du point M d'observation

\vec{r}

Vecteur d'onde

$$\vec{k} = k \vec{u}$$



Vecteur unitaire caractérisant la propagation

\vec{u}