

Acoustique
Cours 4
Propagation, isolation, rayonnement

D. Duhamel

Plan

1. Multicouches et parois

1. Transmission à une interface
2. Transmission à travers une paroi

2. Isolation acoustique de locaux

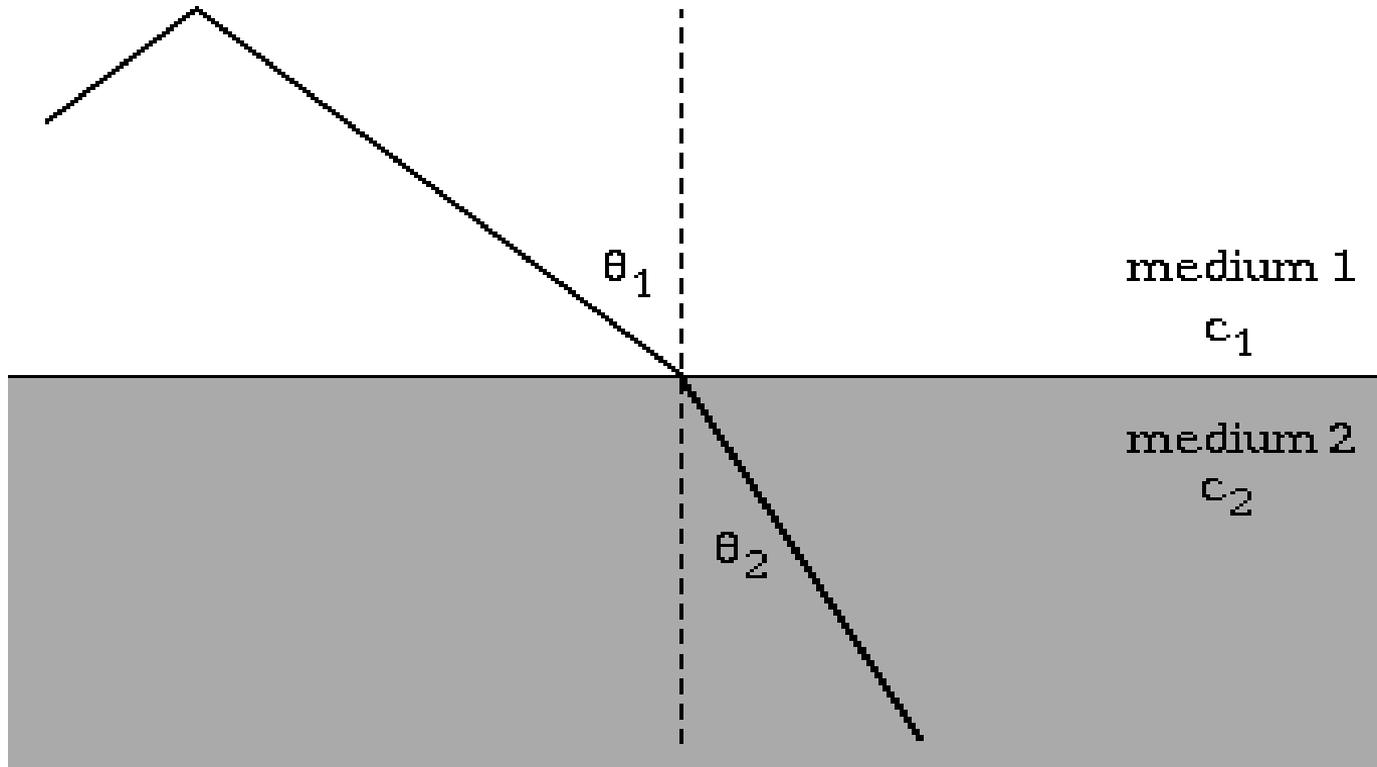
1. Isolation contre les bruits aériens
2. Isolation contre les bruits solidiens

3. Rayonnement acoustique

1. Piston
2. Sphère

1.Multicouches et parois

Interface entre deux milieux acoustiques



Onde incidente $p_i(x, y) = p_i r^{i(k_x x + k_y y)}$

Onde réfléchie $p_r(x, y) = p_r e^{i(k_x^r x + k_y^r y)}$

Onde transmise $p_t(x, y) = p_t e^{i(k_x^t x + k_y^t y)}$

$$p_i(x, 0) + p_r(x, 0) = p_t(x, 0)$$

$$k_x = k_x^r = k_x^t = k_1 \sin \theta_1 = k_2 \sin \theta_2$$

Loi de Descartes

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

•Onde incidente

$$p_i(x, y) = p_i e^{i(k_1 \sin \theta_1 x - k_1 \cos \theta_1 y)}$$

•Onde réfléchie

$$p_r(x, y) = p_r e^{i(k_1 \sin \theta_1 x + k_1 \cos \theta_1 y)}$$

•Onde transmise

$$p_t(x, y) = p_t e^{i(k_2 \sin \theta_2 x - k_2 \cos \theta_2 y)}$$

Détermination des amplitudes

- Continuité de la pression

$$p_i + p_r = p_t$$

- Continuité de la vitesse

$$-\frac{\cos \theta_1}{\rho_1 c_1} p_i + \frac{\cos \theta_1}{\rho_1 c_1} p_r = -\frac{\cos \theta_2}{\rho_2 c_2} p_t$$

$$-i \rho \omega v = -\nabla p \qquad v = \frac{1}{i \rho \omega} \nabla p$$

Solution

$$p_r = \frac{\cos \theta_1 Z_2 - \cos \theta_2 Z_1}{\cos \theta_2 Z_1 + \cos \theta_1 Z_2} p_i$$

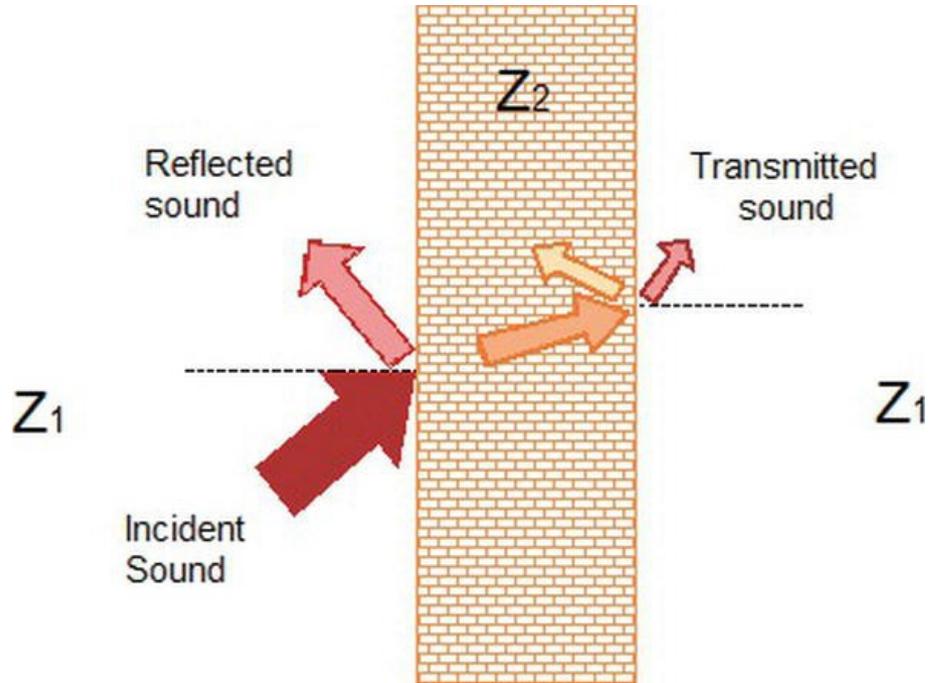
$$p_t = \frac{2 \cos \theta_1 Z_2}{\cos \theta_2 Z_1 + \cos \theta_1 Z_2} p_i$$

Impédances spécifiques de chaque milieu

$$Z_1 = \rho_1 c_1$$

$$Z_2 = \rho_2 c_2$$

Transmission à travers une paroi



TL = Transmission Loss

R = Indice d'affaiblissement acoustique

$$R = TL = 10 \log_{10} \frac{P_{incident}}{P_{transmis}}$$

$P_{incident}$: Puissance incidente

$P_{transmis}$: Puissance transmise

Bilan d'énergie pour une paroi

$$E_i = E_t + E_a + E_r$$

E_i énergie incidente (W/m^2)

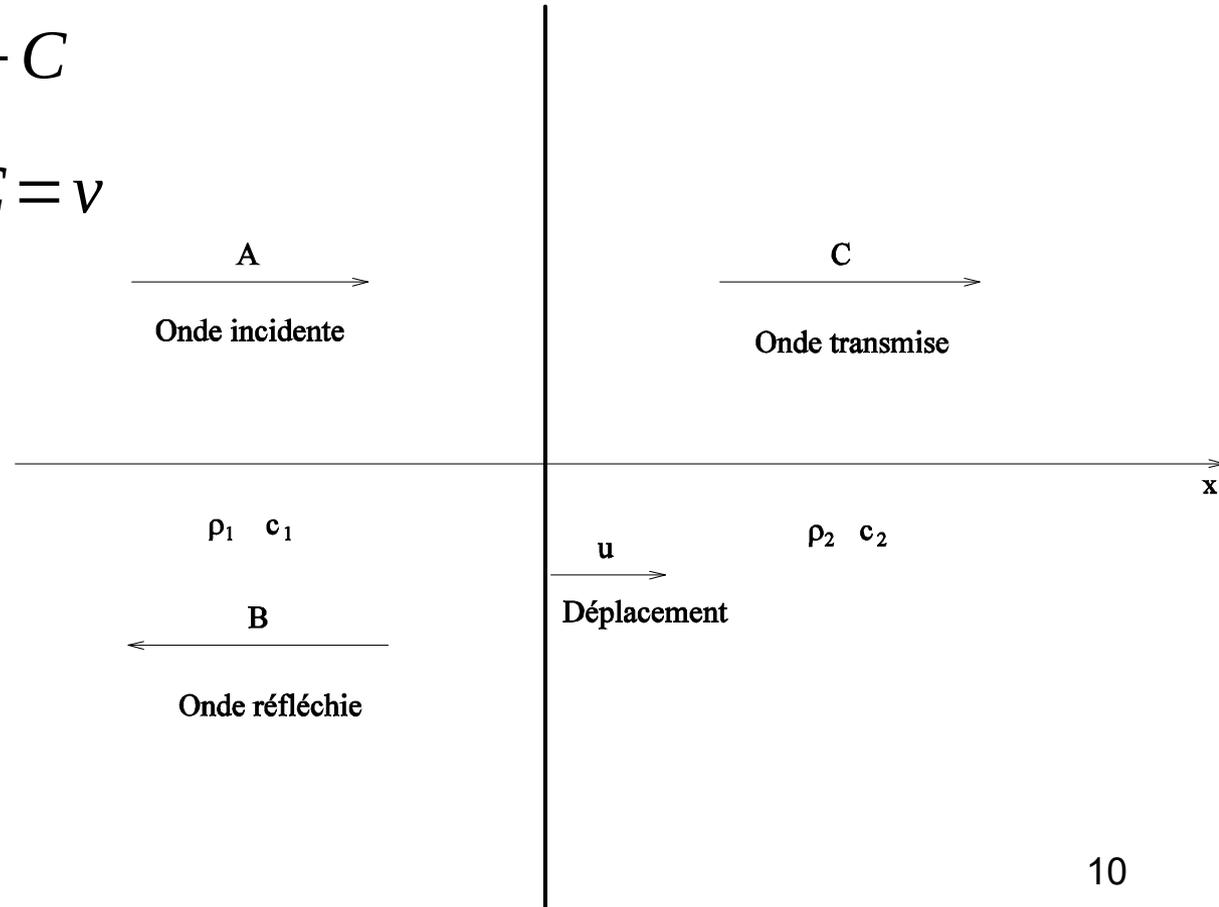
E_t énergie transmise (W/m^2)

E_a énergie absorbée (W/m^2)

E_r énergie réfléchie (W/m^2)

Cas d'une paroi mince en incidence normale

$$\begin{aligned}
 -i\omega mv &= A+B-C \\
 \frac{ik_1}{i\rho_1\omega}(A-B) &= \frac{ik_2}{i\rho_2\omega}C = v
 \end{aligned}$$



Avec par exemple

$$p_i(x, y) = Ae^{ik_1x}$$

$$-i\omega m v = A + B - C \qquad \frac{C}{A} = \frac{2}{1 - \frac{i\omega m}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_2}}$$

$$\frac{ik_1}{i\rho_1\omega} (A - B) = \frac{ik_2}{i\rho_2\omega} C = v$$

$$T = \frac{|C|^2 / (2Z_2)}{|A|^2 / (2Z_1)} = \frac{4Z_1 / Z_2}{\left(1 + Z_1 / Z_2\right)^2 + \left(\omega m / Z_2\right)^2}$$

Si m assez grand et transmission air-air $T \approx \left(\frac{2\rho_0 c}{\omega m}\right)^2$

Loi de masse $TL = 20 \log_{10}(fm) - 42$

Exemple mur en béton

$$\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$$

$$m = \rho e$$

$$TL = 20 \log_{10}(fm) - 42$$

f (Hz)	Atténuation(dB) e = 10cm	Atténuation (dB) e=5cm	Atténuation (dB) e=1cm
100	45	39	25
500	59	53	39
2000	71	65	51
5000	79	73	59

Exemple verre

$$\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$$

$$m = \rho e$$

$$TL = 20 \log_{10}(fm) - 42$$

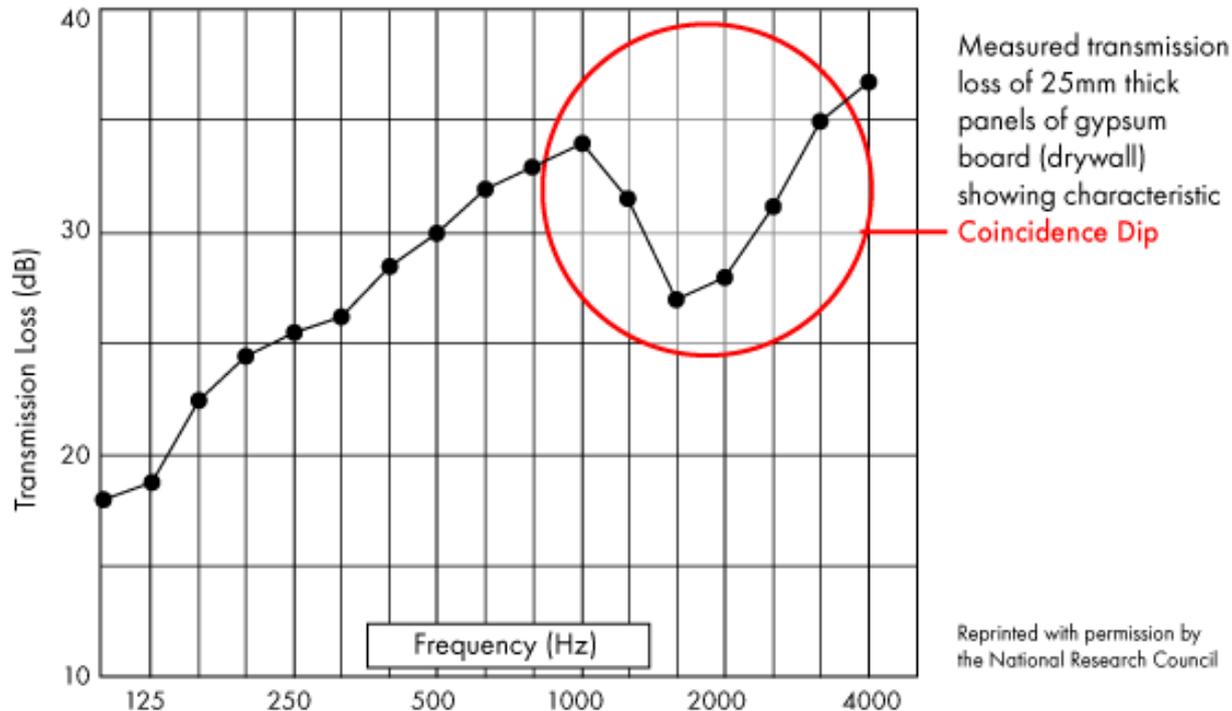
f (Hz)	Atténuation (dB) e=5mm	Atténuation (dB) e=2mm
100	20	12
500	34	26
2000	46	38
5000	54	46

En tenant compte des ondes avec une incidence oblique l'atténuation est un peu plus faible

Atténuation du son par une fenêtre

Fréquence de coïncidence de paroi

Quand la longueur d'onde des ondes dans la paroi est égale à la longueur d'onde des ondes dans l'air



Chute de TL à la fréquence critique f_c :

- 3 à - 4 dB (caoutchouc, liège, plomb, ...),
- 6 à - 8 dB (polystyrène, béton, plâtre, bois, ...),
- 10 dB (verre, acier, aluminium, ..).

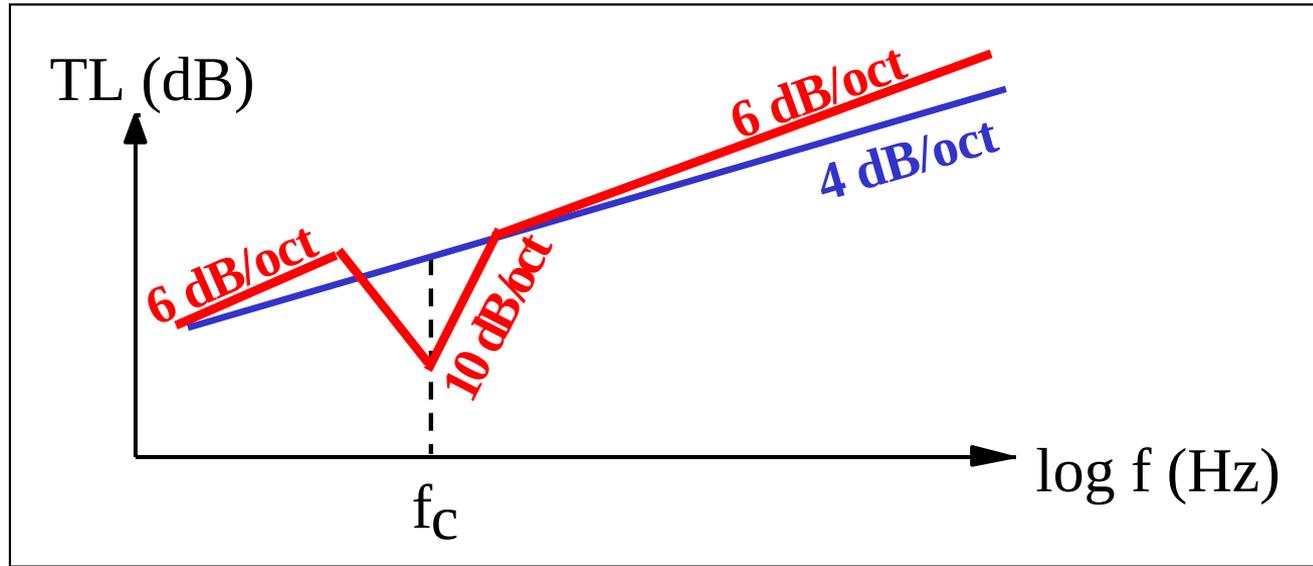
TL = 35 dB(A) : on entend tout

TL = 40 dB(A) : difficile de comprendre ce qui se dit

TL = 45 dB(A) : conversations à voix forte peu compréhensibles

TL = 50 dB(A) : conversation inaudible

Représentation de $TL = g(f)$



Remarque sur les pentes

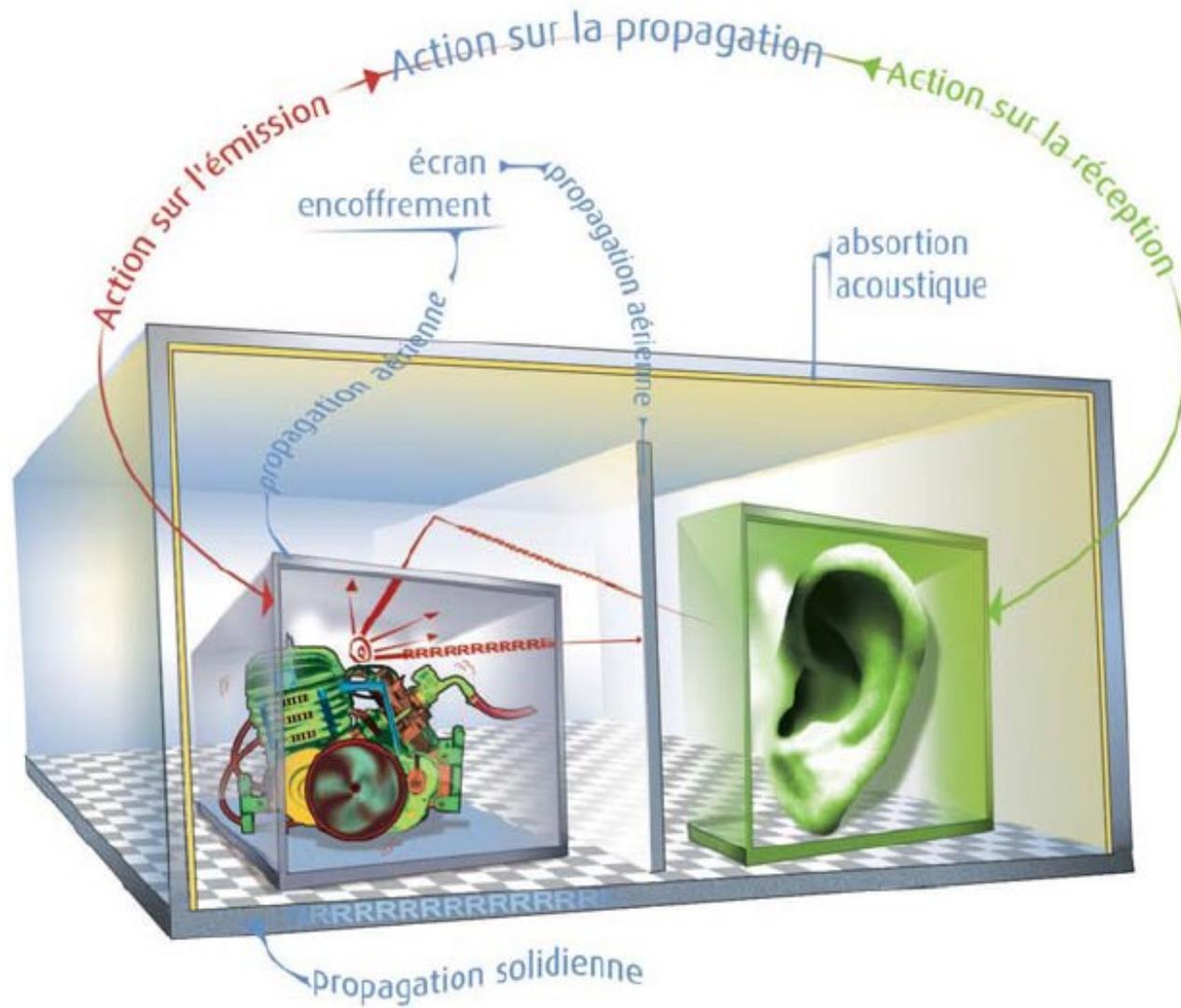
4 dB/octave : loi expérimentale correspondant à un champ diffus.

6 dB/octave : loi théorique correspondant à des ondes planes, parallèles à la paroi.

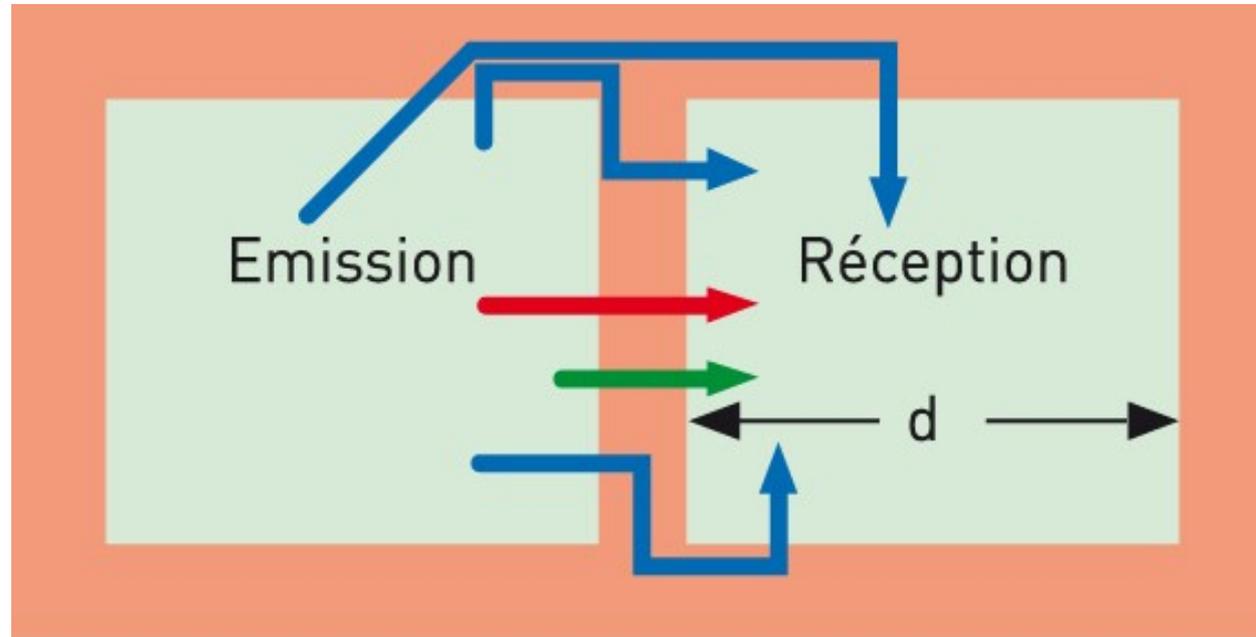
2. Isolation acoustique de locaux

Différence isolation / correction acoustique

- Correction acoustique : assurer la qualité acoustique d'un local (voir prochain cours)
- Isolation : réduire la transmission entre les sources et les récepteurs



Différents modes de transmission



-  Transmissions directes
-  Transmissions latérales
-  Transmissions parasites

Différents chemins de propagation

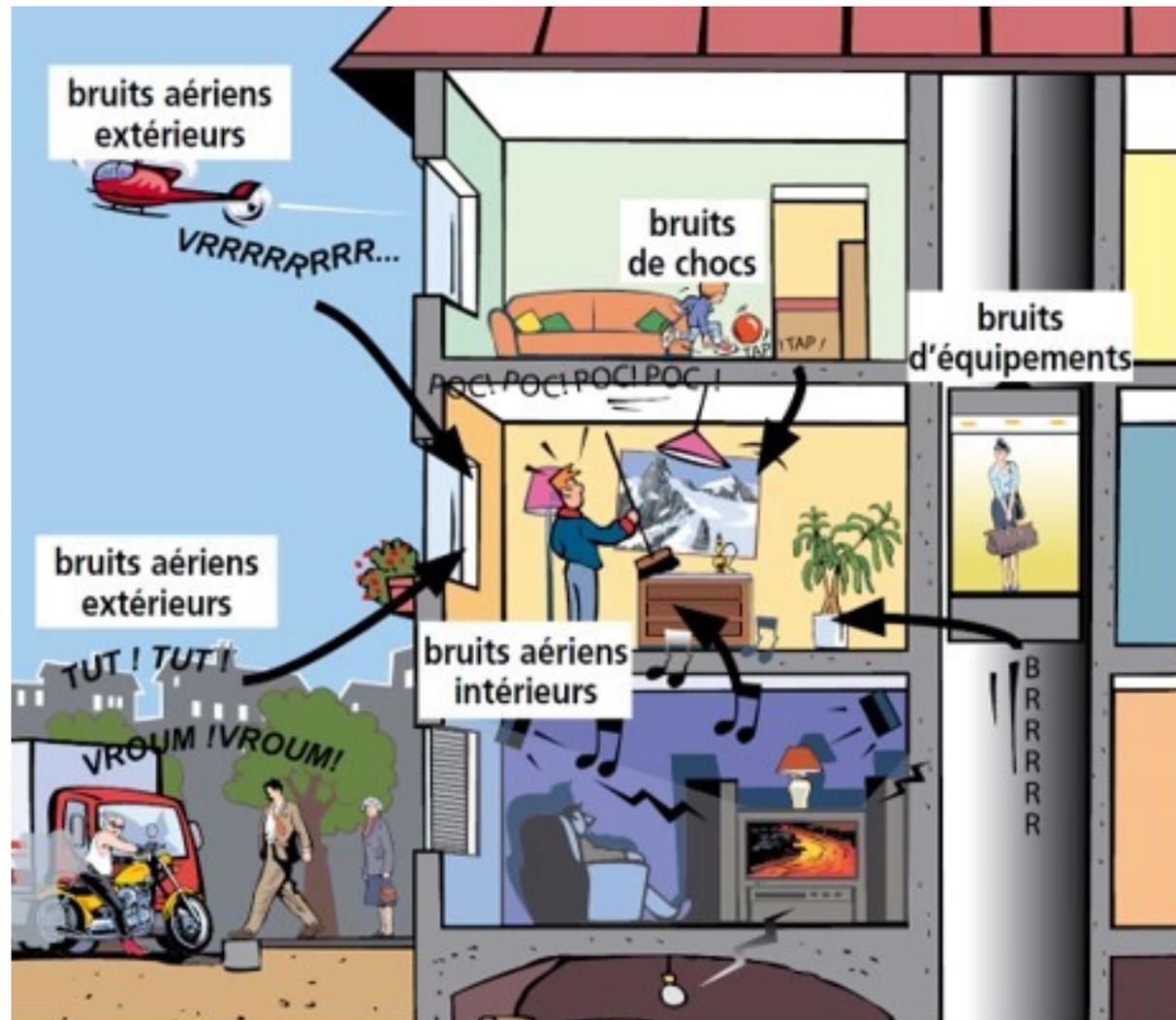
- Voie aérienne

Les bruits aériens sont générés par des sources qui n'ont aucun contact avec la structure du bâtiment : voix, télévision, téléphone, trafic routier

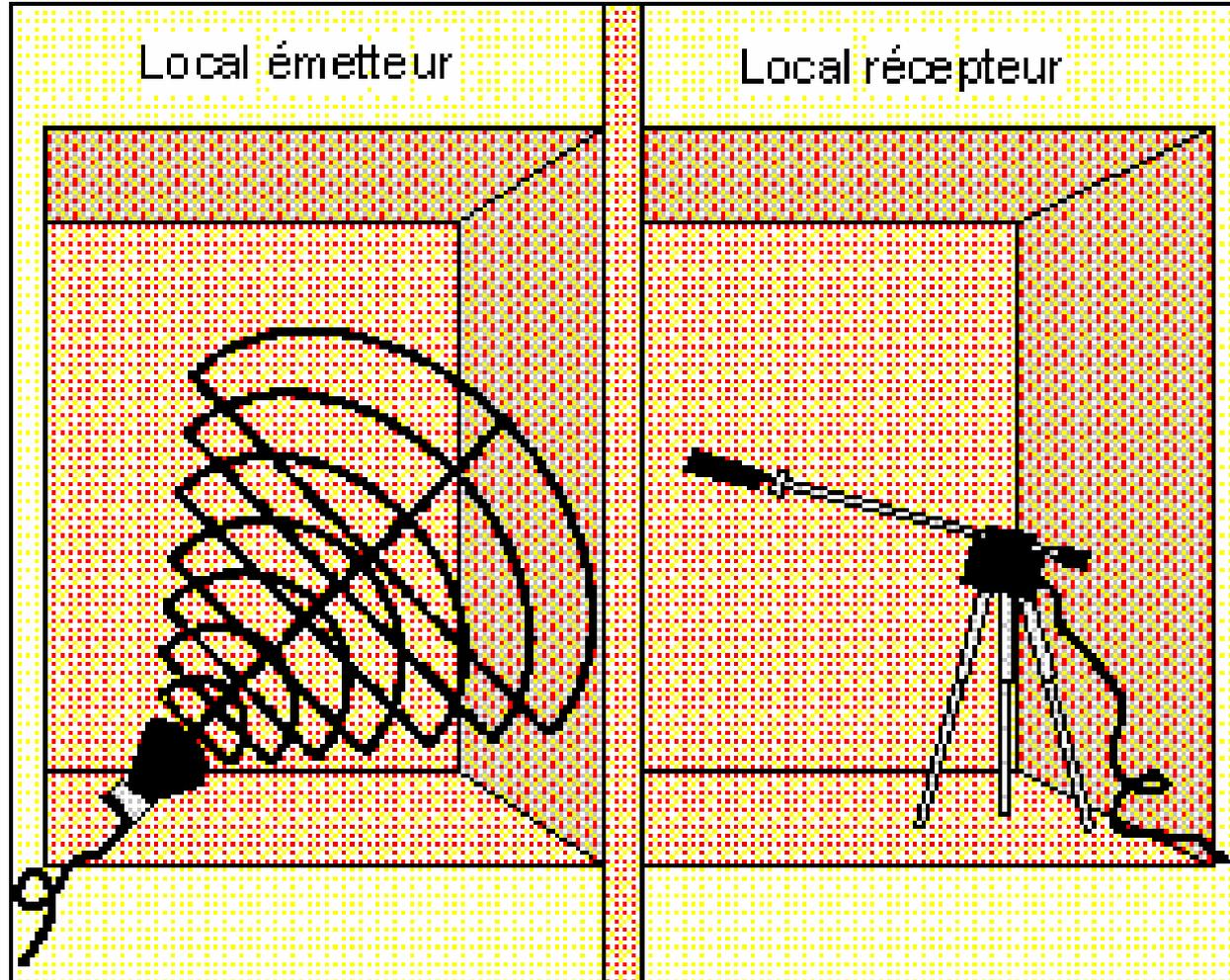
- Voie solidienne

Les bruits solidiens sont générés par des sources qui sont liées à la structure du bâtiment, ou qui la frappent

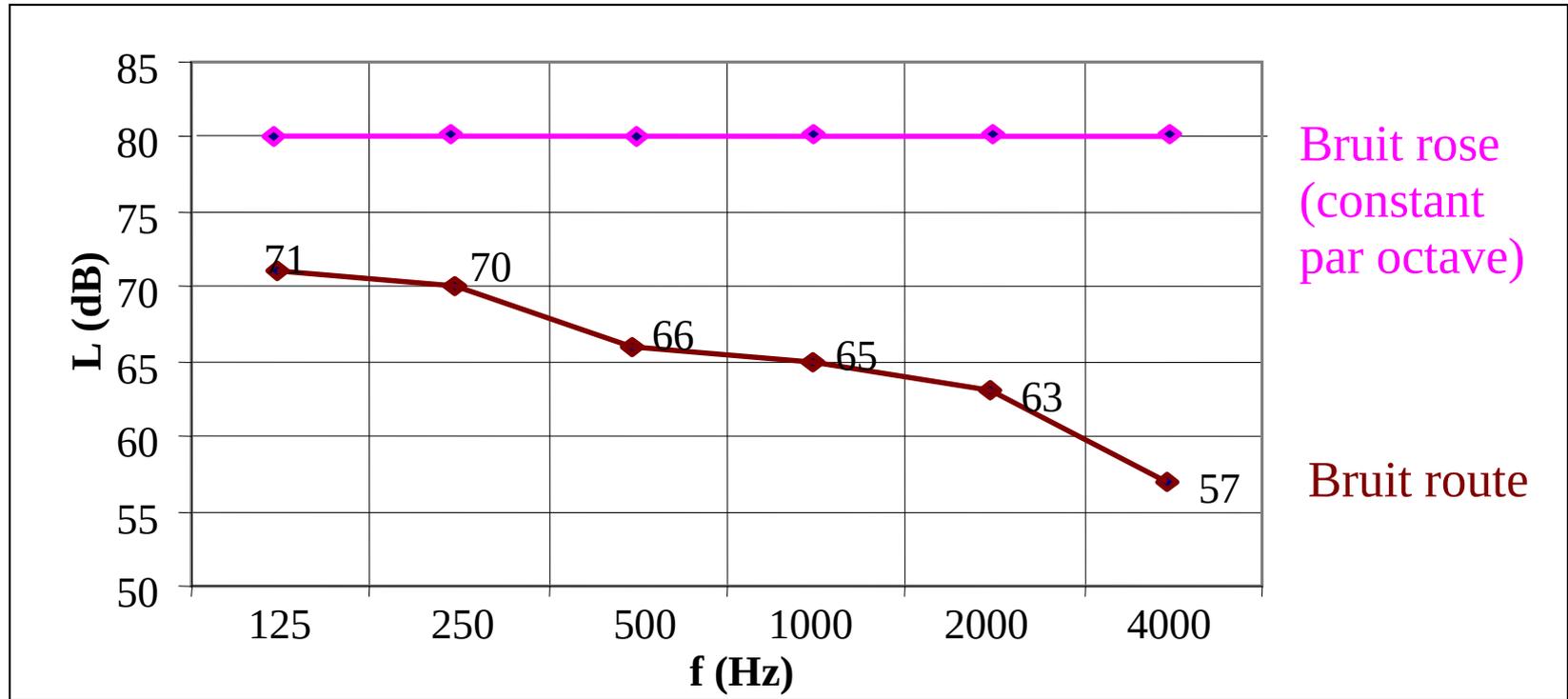
- les bruits de choc (ou bruits d'impact) : bruits de pas, chutes d'objets
- les vibrations : chauffage, ventilation, climatisation



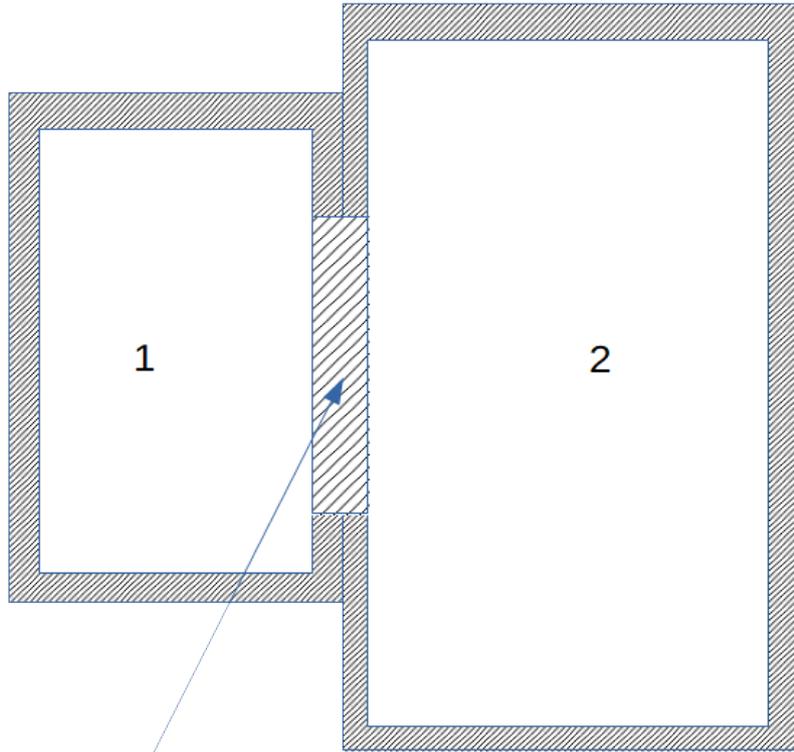
Isolation contre les bruits aériens



Emission d'un bruit rose ou d'un bruit routier



Transparence acoustique de panneaux



Panneau étudié

Deux notions différentes :

- Indice d'affaiblissement acoustique de la paroi
Caractéristique du panneau seul
- Isolation acoustique entre les locaux
Dépend du panneau et des locaux

Calcul des niveaux sonores dans chaque salle

Indice d'affaiblissement acoustique de la paroi

$$TL = R = 10 \log_{10} \frac{P_{incident}}{P_{transmis}} = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} = -10 \log_{10} \tau$$

avec

$$\tau = \frac{P_{transmis}}{P_{incident}}$$

Bilan d'énergie dans la salle 1

- Puissance émise par la source : P
- Puissance perdue vers la salle 2 : $I_1 S_c \tau$
- Puissance gagnée venant de la salle 2 : $I_2 S_c \tau$
- Puissance absorbée dans la salle 1 : $\alpha_1 I_1 S_1$

Bilan $P + I_2 S_c \tau = I_1 S_c \tau + \alpha_1 I_1 S_1$

$$\text{Bilan salle 1} \quad P + I_2 S_c \tau = I_1 S_c \tau + \alpha_1 I_1 S_1$$

$$\text{Bilan salle 2} \quad I_1 S_c \tau = I_2 S_c \tau + \alpha_2 I_2 S_2$$

$$P + I_2 S_c \tau = I_1 (S_c \tau + \alpha_1 S_1)$$

$$I_1 S_c \tau = I_2 (S_c \tau + \alpha_2 S_2)$$

$$\begin{array}{l} I_1 A_1 - I_2 S_c \tau = P \\ I_1 S_c \tau - I_2 A_2 = 0 \end{array} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} A_1 = \alpha_1 S_1 + S_c \tau \\ A_2 = \alpha_2 S_2 + S_c \tau \end{array}$$

$$I_1 A_1 - I_2 S_c \tau = P$$

$$I_1 S_c \tau - I_2 A_2 = 0$$

$$I_1 = \frac{P A_2}{A_1 A_2 - (S_c \tau)^2}$$

$$I_2 = \frac{P S_c \tau}{A_1 A_2 - (S_c \tau)^2}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{S_c \tau}{A_2} = \frac{S_c \tau}{\alpha_2 S_2 + S_c \tau}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{S_c \tau}{\alpha_2 S_2 + S_c \tau}$$

La différence de niveau sonore entre les salles est

$$L_2 - L_1 = 10 \log_{10} \frac{I_2}{I_1} = 10 \log_{10} \frac{S_c \tau}{\alpha_2 S_2 + S_c \tau}$$

Isolement acoustique entre les deux locaux D

$$D = L_1 - L_2 = R + 10 \log_{10} \frac{\alpha_2 S_2 + S_c \tau}{S_c}$$

$$\approx R + 10 \log_{10} \frac{\alpha_2 S_2}{S_c}$$

Pour une paroi réelle

$$S_c \tau \ll \alpha_2 S_2$$

Paroi non homogène constituée de parois juxtaposées

La puissance transmise par chaque panneau est $I_i \tau_i S_i$

$$\tau_{tot} = \frac{\tau_1 S_1 + \tau_2 S_2 + \dots + \tau_n S_n}{S_{tot}}$$

Exemple :

Porte de largeur 1,5m de hauteur 2,5m avec $R = 50\text{dB}$

Il y a une fente de 1,5m de largeur et de 1mm de hauteur sous la porte

$$S_p = 3,75 \text{ m}^2, R_p = 50 \text{ dB}, \tau_p = 10^{-5}$$

$$S_f = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2, \tau_f = 1$$

$$\tau_{tot} = 4,1 \cdot 10^{-4}, R_{tot} = 34 \text{ dB}$$

$$P = IA = I \alpha S$$

$$I = \frac{p^2}{4 \rho c}$$

(Le 4 vient d'une moyenne sur tous les angles d'incidence)

	Salle 1	Salle 2
Puissance de la source	1mW	1mW
Dimensions	15mx13mx8m	30mx24mx12m
Coefficient d'absorption moyen	0,2	0,5
Surface S (m ²)	838	2736
Absorption A (m ²)	168	1368
Niveau sonore (dB)	74	65

Transmissions parasites : ponts phoniques

- Gaines et canalisations
 - Gaines techniques (à désolidariser de la structure)
 - VMC
 - Coffres de volets roulants
 - ...
- Défauts de conception ou d'exécution
 - défauts de montage
 - défauts d'étanchéité
 - passages d'air
 - joints mal réalisés
 - ...

Isolation contre les bruits solidiens

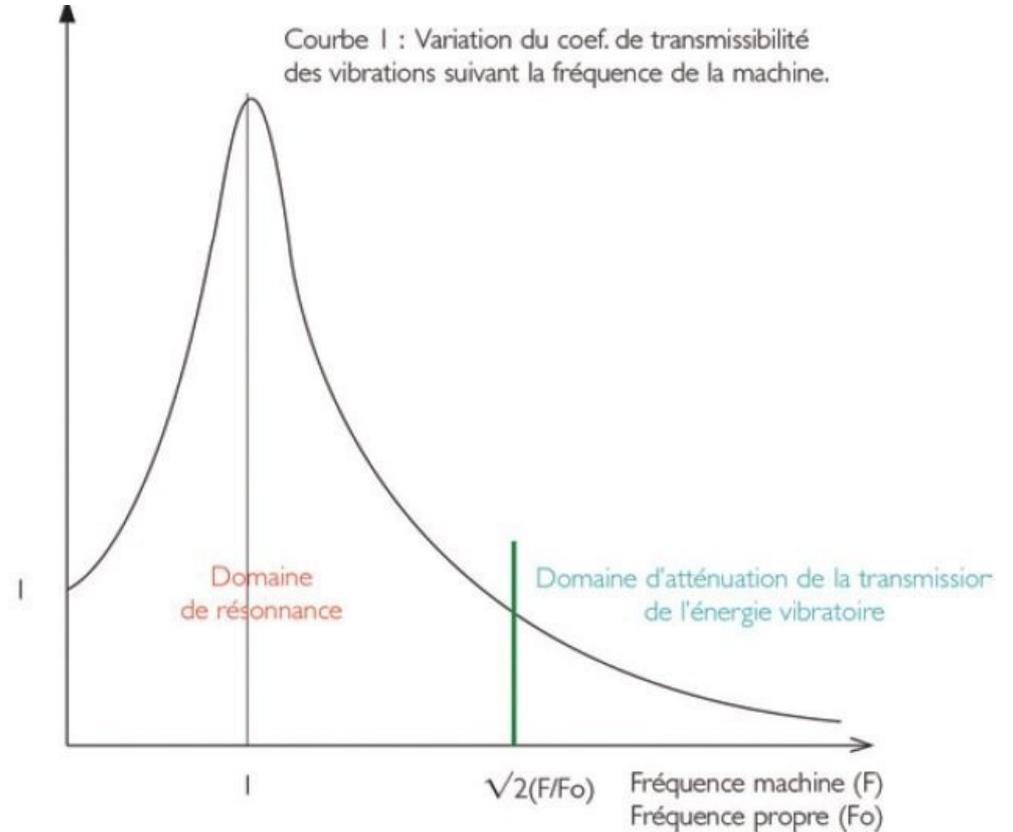
Application d'une force

- Bruit vibratoire
 - Chaudière
 - Ventilation
 - Ascenseurs
 - Robinetterie
 - ...
- Bruit d'impact
 - Marche
 - Chute d'objets
 - Claquement de portes
 - ...

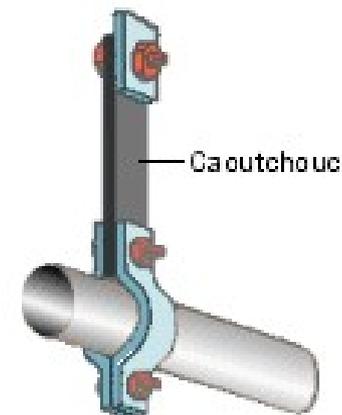
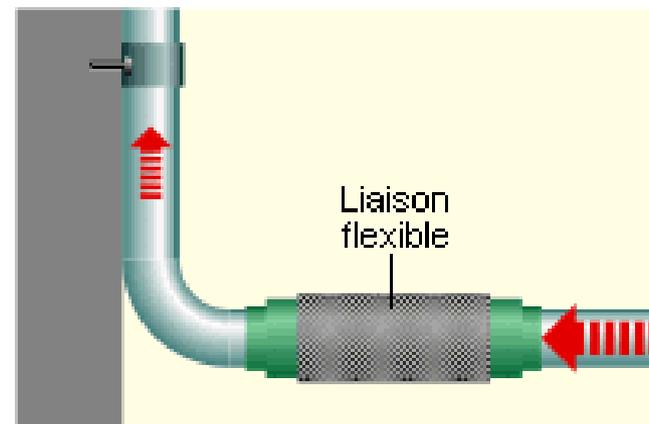
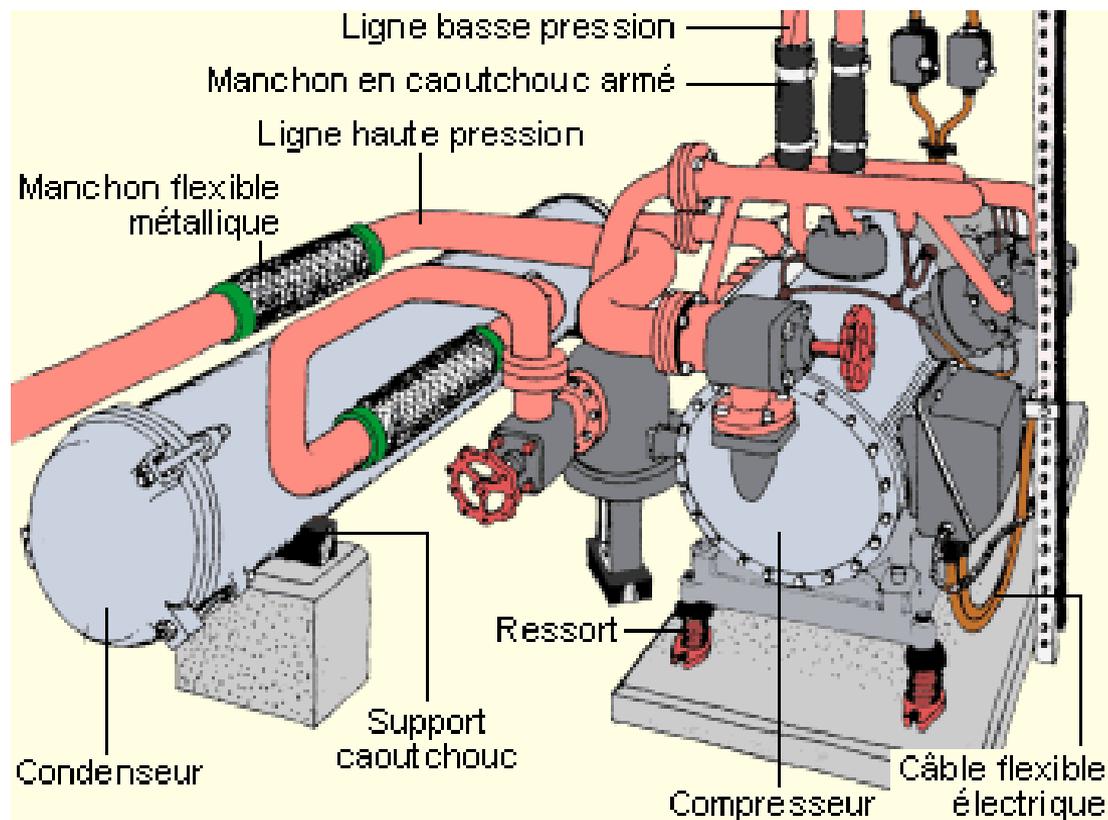
Prévoir des coupures acoustiques avec des matériaux résilients (qui gardent leur élasticité sous une charge permanente)

- Dalle flottante : coupure élastique contre le bruit de marche
- Désolidarisation des appareils de chauffage et de la plomberie
- ...

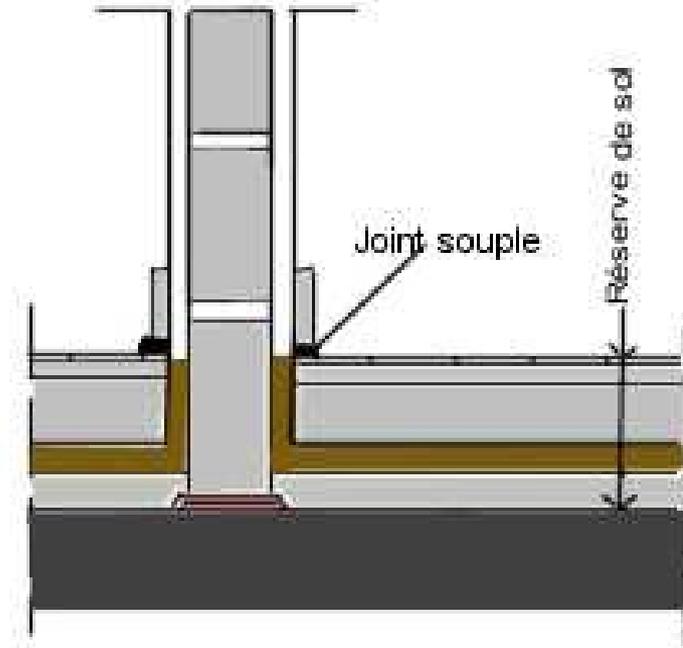
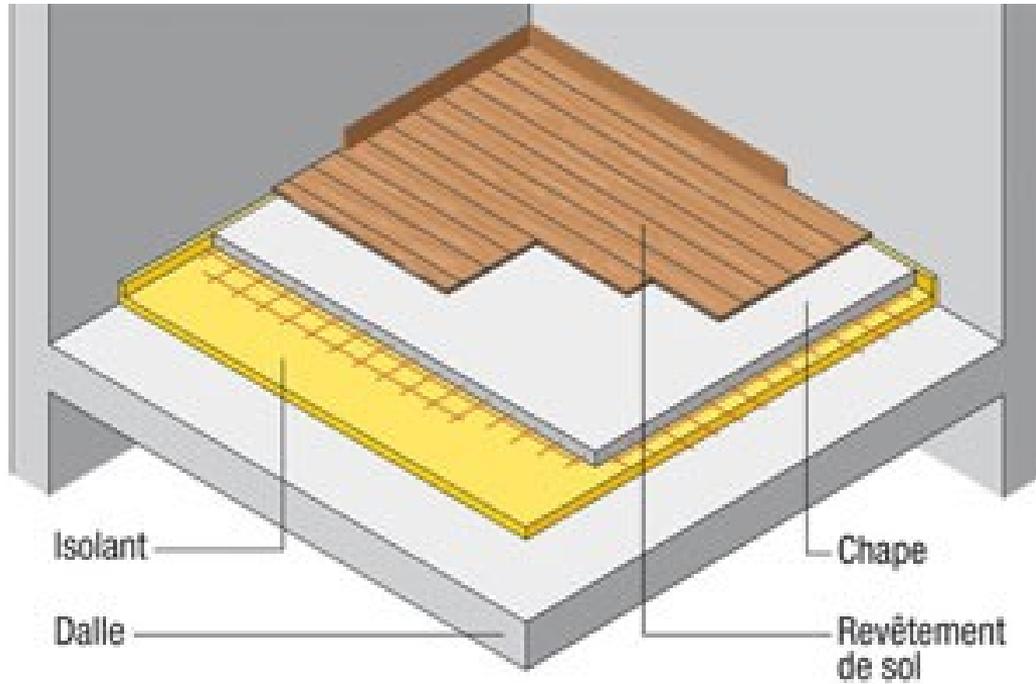
Montage sur plots

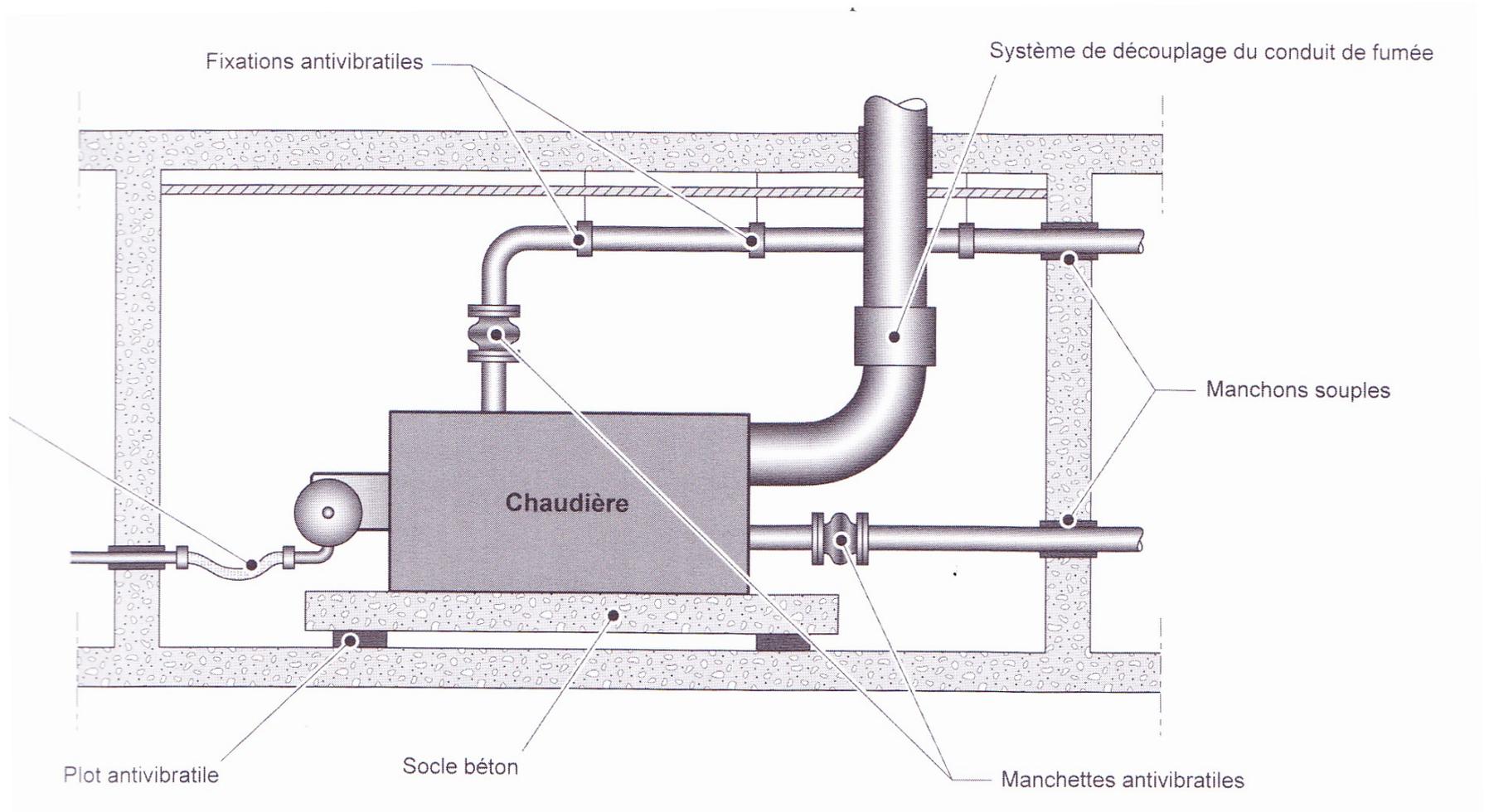


Transmission par les conduits

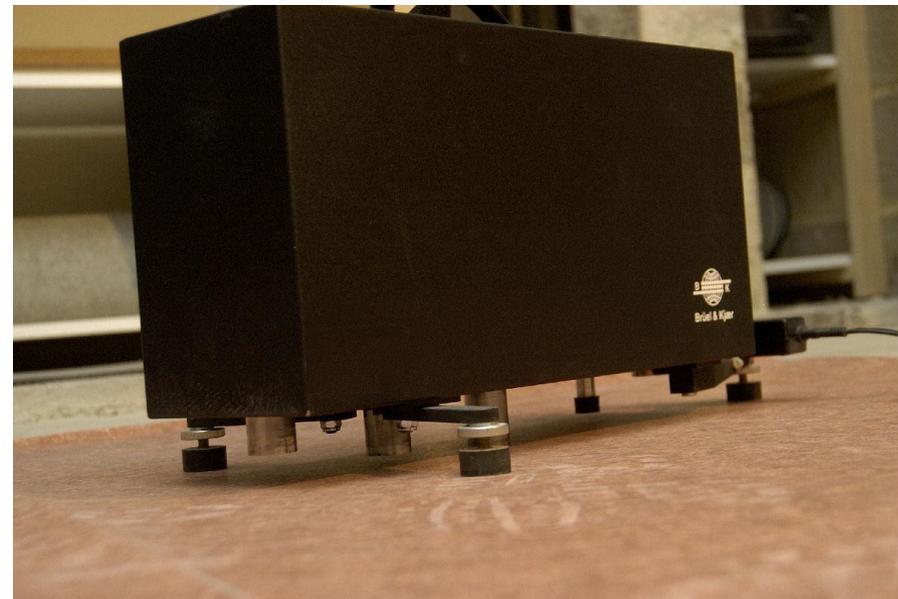
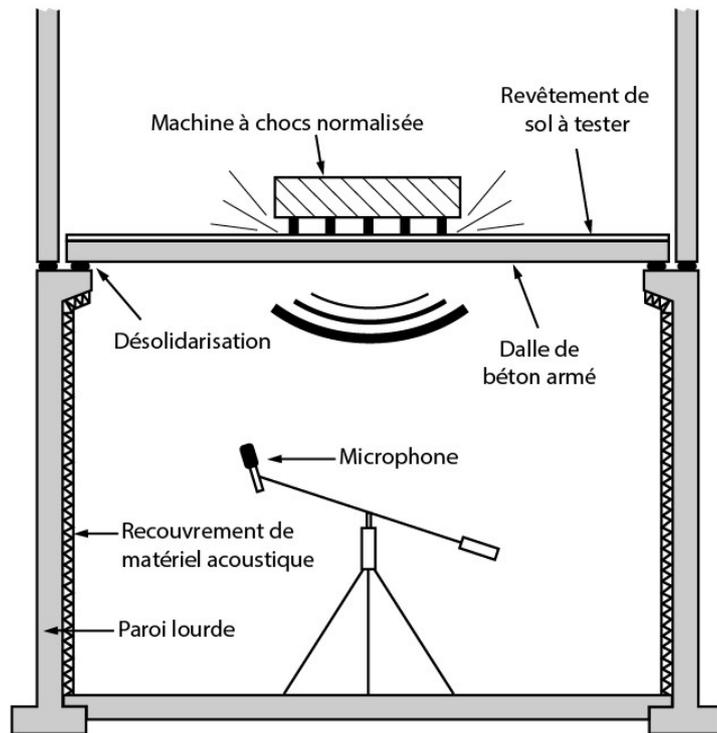


Isolation de planchers





Mesure avec une machine à chocs



3. Rayonnement acoustique

Instruments de musique



Machines, moteurs



**Compréhension
des sources
sonores**

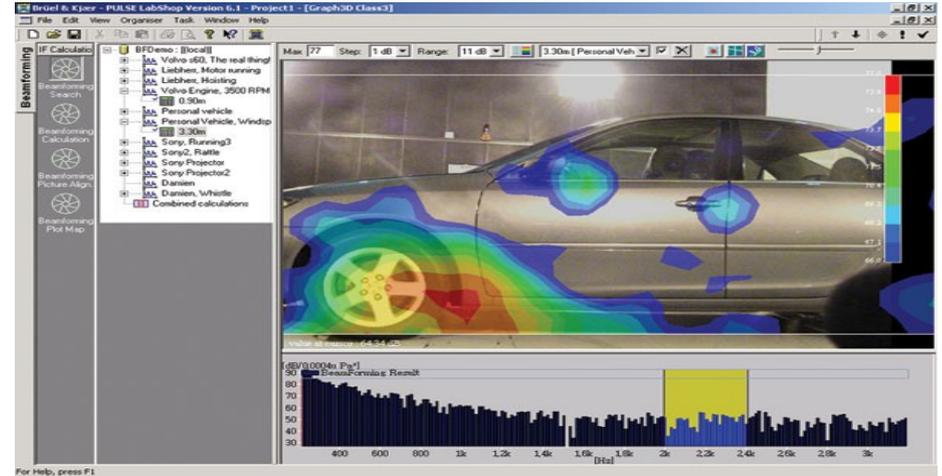
Train



Avion



Automobile



Problème de rayonnement

Trouver la pression dans le fluide telle que

En fréquence

$$\Delta p + k^2 p = 0 \text{ dans } \Omega_f$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = i \rho_0 \omega v_0 \text{ sur } \partial \Omega_f$$

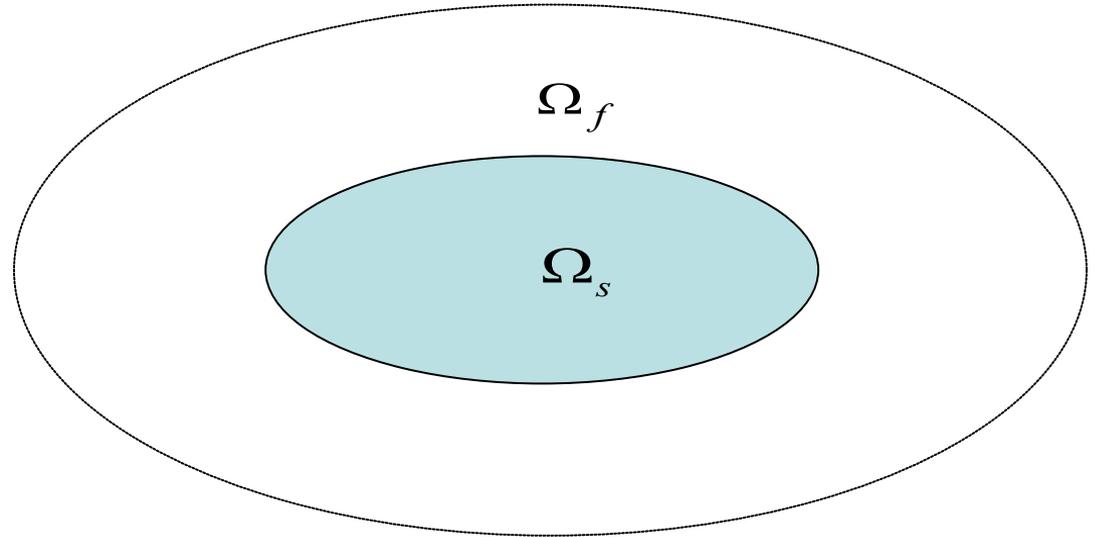
$$\frac{\partial p}{\partial n} - ikp = o\left(\frac{1}{r}\right) \text{ à l'infini}$$

En temps

$$\Delta p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \text{ dans } \Omega_f$$

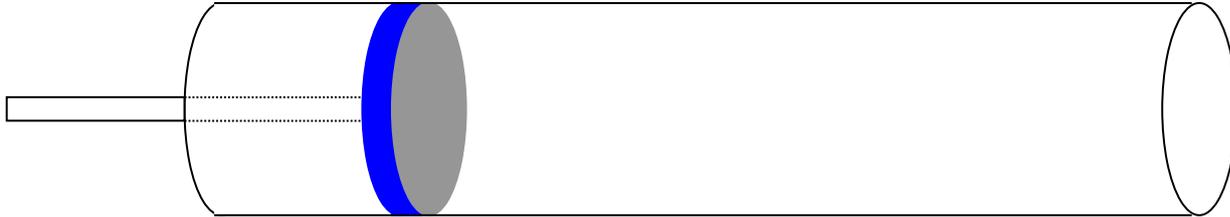
$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho_0 \frac{\partial v_0}{\partial t} \text{ sur } \partial \Omega_f$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} + \frac{1}{c} \frac{\partial p}{\partial t} = o\left(\frac{1}{r}\right) \text{ à l'infini}$$



Rayonnement d'un piston

- Pression uniforme
- Source mouvement du piston



$$v_p(t) = v_0 \cos(\omega t)$$

Le mouvement du piston est supposé donné par

$$v_p(t) = v_0 \cos(\omega t)$$

Mouvement du fluide

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

Les pressions et vitesses sont données par

$$p(x, t) = \operatorname{Re} \left(P e^{i(kx - \omega t)} \right)$$

$$v(x, t) = \operatorname{Re} \left(V e^{i(kx - \omega t)} \right)$$

$$V = v_0$$

$$P = \rho_0 c v_0$$

En temps

$$p(x, t) = \rho_0 c v_0 \cos(kx - \omega t)$$

$$v(x, t) = v_0 \cos(kx - \omega t)$$

Puissance rayonnée

$$\begin{aligned} \text{Puis} &= \frac{1}{T} \int_0^T \rho_0 c v_0 \cos(kx - \omega t) v_0 \cos(kx - \omega t) dt \\ &= \frac{1}{2} \rho_0 c v_0^2 \\ &= \frac{1}{2} Z v_0^2 \end{aligned}$$

Cas d'une sphère avec une surface uniforme

Sphère vibrant uniformément sur sa surface : symétrie sphérique

$$p(r) = p(a) e^{ik(r-a)} \frac{a}{r}$$

La vitesse des points de la surface de la sphère est donnée par

$$-i \rho_0 \omega v + \frac{dp}{dr} = 0$$

$$v(r) = \frac{a p(a)}{i \rho_0 \omega r^2} (ikr - 1) e^{ik(r-a)}$$

Sur la surface de rayon a , nous avons

$$p(a) = \frac{i \rho_0 \omega a}{ika - 1} v(a)$$

La puissance rayonnée par la sphère de surface $S=4\pi r^2$ est donc

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} S \operatorname{Re}(p^* v) \\ &= \frac{1}{2} S \operatorname{Re}\left(\frac{-i \rho_0 \omega a}{-ika - 1} |v|^2\right) \\ &= \frac{1}{2} S |v|^2 \operatorname{Re}\left(i \rho_0 \omega a \frac{1 - ika}{1 + (ka)^2}\right) \\ &= \frac{1}{2} S |v|^2 \rho_0 c \frac{(ka)^2}{1 + (ka)^2} \end{aligned}$$

$$W = \frac{1}{2} S |v|^2 \rho_0 c \frac{(ka)^2}{1 + (ka)^2}$$

- Le rayonnement est faible quand $ka < 1$ soit

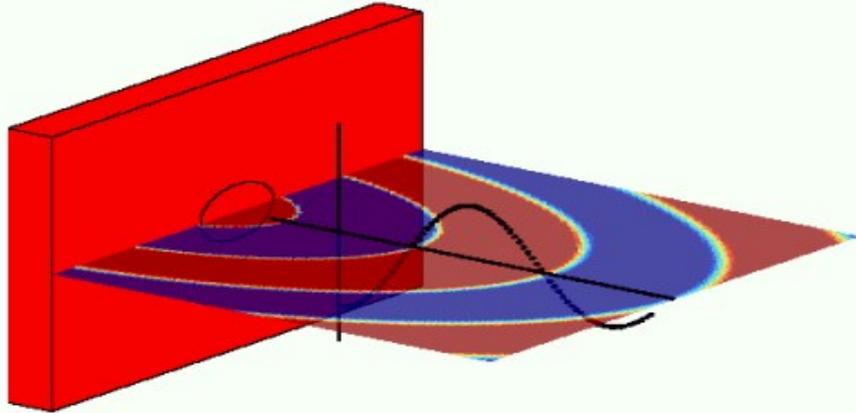
$$a < \frac{\lambda}{2\pi}$$

- Le résultat est en fait bien plus général.
- Les objets de taille petite par rapport à la longueur d'onde rayonnent mal le son.

Exemples de rayonnement

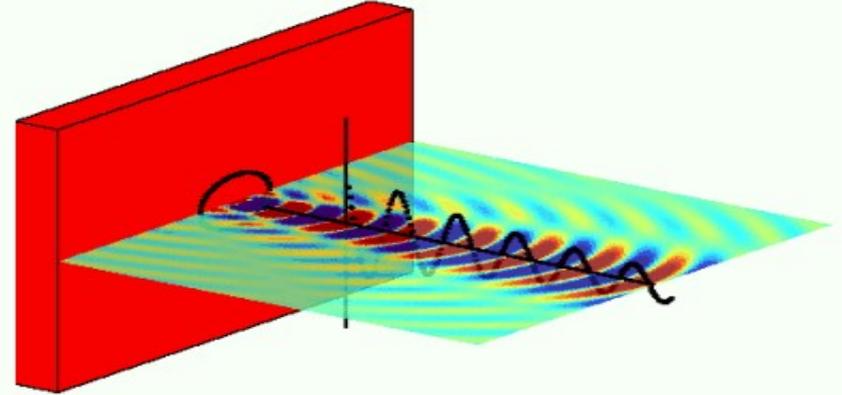
Rayonnement d'un objet à différentes fréquences
Directivité du rayonnement

Low Frequency



isvr

High Frequency



isvr

- Problème très important en pratique
- Difficile à calculer
- Besoin de méthodes numériques (EF ou Equation intégrale)

FIN