



PHS 4700
Physique pour les applications multimédia

Chapitre 8 — Complément d'acoustique

G. Marleau

Automne 2016

Table des matières

Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Musique
Conclusions

Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Musique
Conclusions

Réflexion et réfraction

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

En acoustique physique on considère la réflexion et la réfraction du son d'une façon tout à fait semblable à ce que l'on fait pour la lumière. Le son étant une onde (de pression) et se déplaçant en ligne droite dans un milieu on supposera qu'il subira.

- une réflexion parfaite (ou miroir) par une surface ;
- une transmission parfaite entre deux milieux.

Ce sont ces modèles que nous étudierons (ici et pour l'optique) et qui se révèleront très utiles dans des situations où la réflexion et la transmission ne sont pas parfaites.

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Analyse de la réflexion

- Supposons que l'on associe à l'onde sonore qui se déplace en 3-D un vecteur unitaire \vec{u}_i qui décrit sa direction initiale de propagation

$$\vec{u}_i = \frac{\vec{r}_m - \vec{r}_s}{|\vec{r}_m - \vec{r}_s|}$$

avec \vec{r}_s la position de départ de l'onde (la source) et \vec{r}_m le point où elle touche la surface réfléchissante (miroir).

Réflexion et réfraction

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

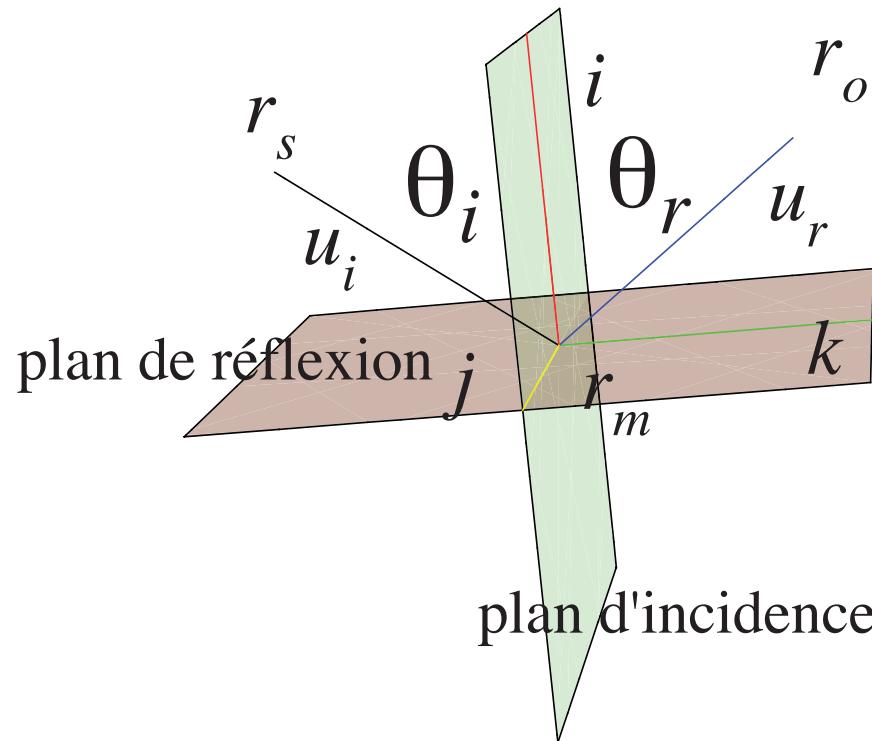
Son

Audition

Musique

Conclusions

Notation en 3-D pour la réflexion.



Réflexion et réfraction

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- Si on connaît la normale unitaire \vec{i} (sortante) à la surface au point \vec{r}_m , il est alors possible de définir un vecteur unitaire \vec{j} qui est perpendiculaire à \vec{i} et \vec{u}_i en utilisant

$$\vec{j} = \frac{\vec{u}_i \times \vec{i}}{|\vec{u}_i \times \vec{i}|}$$

- Le plan défini par \vec{i} et \vec{j} est le plan d'incidence.
- Le plan de réflexion peut être défini en utilisant les vecteurs unitaires \vec{j} et \vec{k} avec

$$\vec{k} = \vec{i} \times \vec{j}$$

qui est la normale au plan d'incidence.

Réflexion et réfraction

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- L'onde sera réfléchie de façon symétrique par rapport au plan d'incidence (tout ce qui change c'est sa composante \vec{i} qui s'inverse). Ainsi, la direction \vec{u}_r de l'onde après réflexion sera donnée par

$$\begin{aligned}\vec{u}_r &= \vec{u}_i - 2\vec{i}(\vec{u}_i \cdot \vec{i}) \\ &= \vec{i}\sqrt{1 - s_i^2} + \vec{k}s_i \\ s_i &= \vec{k} \cdot \vec{u}_i = \sin\theta_i\end{aligned}$$

Réflexion et réfraction

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- On observe aussi que

$$\vec{u}_r \cdot \vec{k} = \sin \theta_r = \sin \theta_i$$

- Cette relation correspond à l'affirmation que le sinus de l'angle d'incidence θ_i est égal au sinus de l'angle de réflexion θ_r .
- C'est la première loi de Snell-Descartes.

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Symétrie.

- Dans le cas où la source est localisée à la position \vec{r}_o et l'observateur à \vec{r}_s , la trajectoire de l'onde s'inverse ($\vec{i}' = \vec{i}$)

$$\vec{u}'_i = -\vec{u}_r$$

$$\vec{j}' = -\vec{j}$$

$$\vec{k}' = -\vec{k}$$

$$\vec{u}'_r = -\vec{u}_i$$

- Cependant, on a toujours

$$\vec{u}'_r \cdot \vec{k}' = \sin \theta_r = \sin \theta_i = \vec{u}'_i \cdot \vec{k}'$$

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Commentaires :

- cette méthode s'applique difficilement au problème de la réfraction, c'est-à-dire lorsque l'onde traverse une interface entre deux milieux où la vitesse de l'onde est différente (pour la lumière ceci correspond à des milieux ayant des indices de réfraction différents).

Cependant, il existe une méthode élégante pour étudier le trajet d'une onde qu'elle soit réfléchie ou réfractée qui a été suggérée par Fermat en 1658.

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

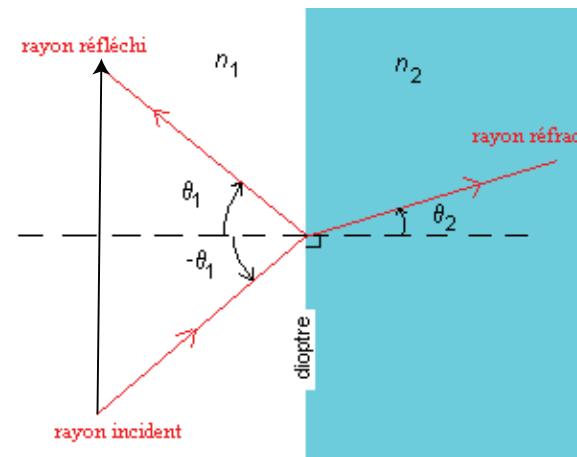
Audition

Musique

Conclusions

Principe de Fermat

Pour aller d'un point à un autre, l'onde suit toujours le trajet dont le temps de parcours est un extrémum (un minimum ou un maximum)



Ici, l'onde peut suivre deux parcours pour se rendre à l'observateur, la trajectoire directe et la trajectoire réfléchie.

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

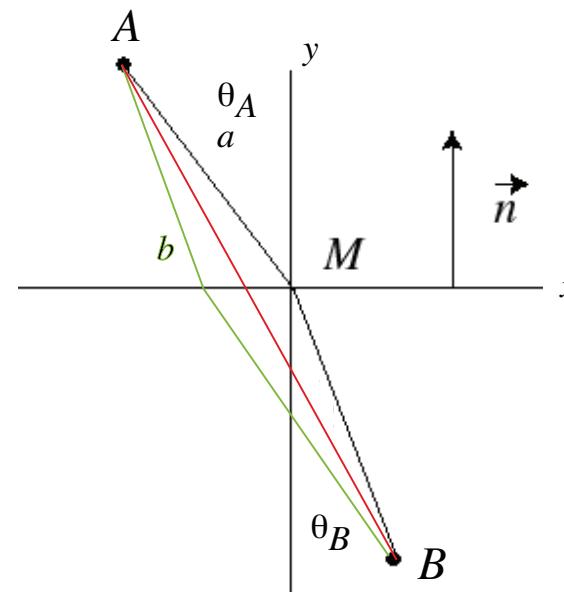
Son

Audition

Musique

Conclusions

Principe de Fermat et réfraction



Il s'agit de déterminer la trajectoire qui minimise ou maximise le temps de parcours entre A et B (a et b sont deux exemples de trajectoires).

Réflexion et réfraction

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Temps de parcours en fonction de θ_A et θ_B en supposant que le plan est croisé à $y = 0$ et x arbitraire.

- Dans la région A où la vitesse de l'onde est c_A

$$t_1(x) = \frac{\sqrt{(x - x_A)^2 + y_A^2}}{c_A}$$

- Dans la région B où la vitesse de l'onde est c_B

$$t_2(x) = \frac{\sqrt{(x_B - x)^2 + y_B^2}}{c_B}$$

Réflexion et réfraction

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

■ Le temps total est

$$t(x) = \frac{\sqrt{(x - x_A)^2 + y_A^2}}{c_A} + \frac{\sqrt{(x_B - x)^2 + y_B^2}}{c_B}$$

■ Trouver le trajet qui maximise ou minimise le temps correspond à déterminer la valeur de x pour laquelle la dérivée est nulle

$$\begin{aligned} \frac{dt(x)}{dx} &= \frac{(x - x_A)}{c_A \sqrt{(x - x_A)^2 + y_A^2}} - \frac{(x_B - x)}{c_B \sqrt{(x_B - x)^2 + y_B^2}} \\ &= 0 \end{aligned}$$

Réflexion et réfraction

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

■ Comme

$$\sin(\theta_A) = \frac{(x - x_A)}{\sqrt{(x - x_A)^2 + y_A^2}}$$

$$\sin(\theta_B) = \frac{(x_B - x)}{\sqrt{(x_B - x)^2 + y_B^2}}$$

■ Alors

$$\frac{\sin(\theta_A)}{c_A} = \frac{\sin(\theta_B)}{c_B}$$

■ C'est la seconde loi de Snell-Descartes.

Réflexion et réfraction

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- Notez que pour l'optique on utilisera

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

avec

$$n_i = \frac{c}{c_i} \quad n_t = \frac{c}{c_t}$$

où c la vitesse de la lumière dans le vide et c_i la vitesse de la lumière dans le milieu i .

- En acoustique, il n'y a pas de vitesse qui peut facilement être choisie pour servir de référence absolue et, au lieu d'utiliser les indices de réfraction, on utilise directement les vitesses.

Réflexion et réfraction

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

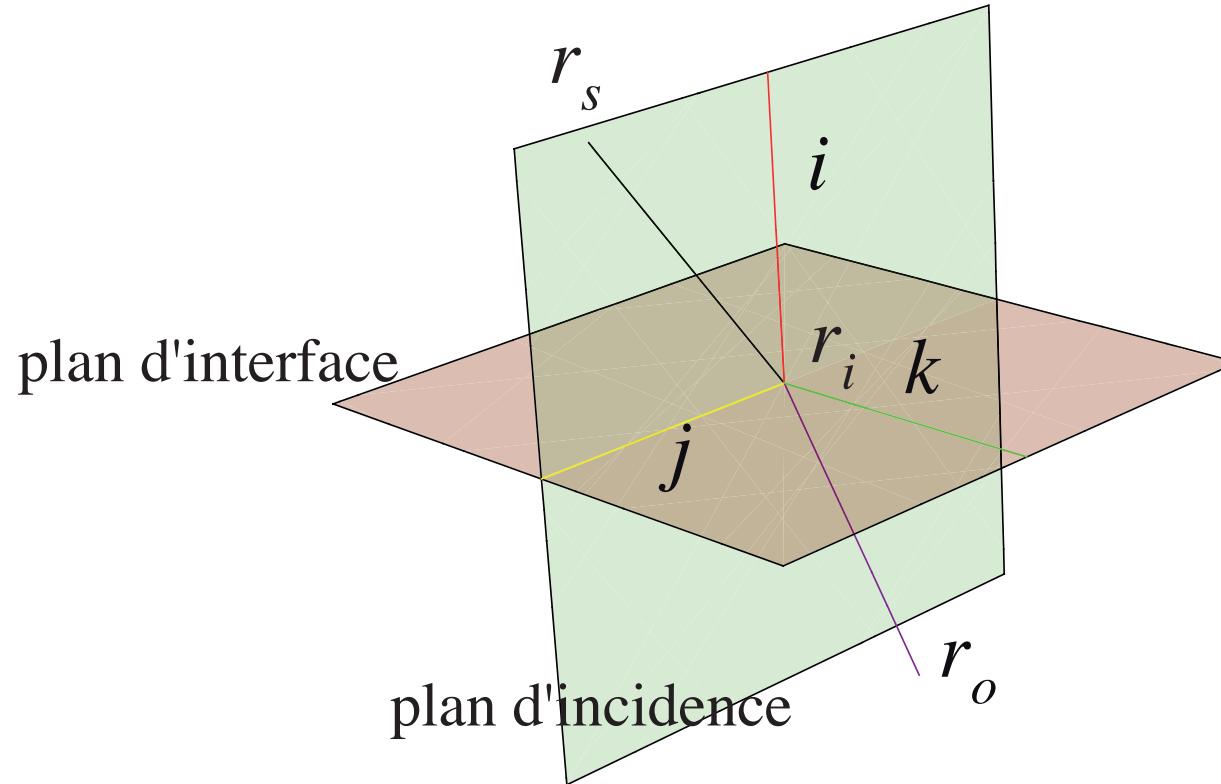
Son

Audition

Musique

Conclusions

Cette démonstration que nous avons réalisée en 2-D est aussi valide en 3-D (dans le plan défini par le rayon incident et le rayon réfracté).



Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

La réfraction.

- \vec{i} est la normale unitaire à la surface au point \vec{r}_i .
- $\vec{j} = (\vec{u}_i \times \vec{i}) / |\vec{u}_i \times \vec{i}|$ est un vecteur unitaire perpendiculaire à \vec{i} et \vec{u}_i et sert à définir (avec \vec{i}) le plan d'incidence.
- $\vec{k} = \vec{i} \times \vec{j}$ est la normale unitaire au plan d'incidence et sert (avec \vec{j}) à définir le plan de réflexion.

Réflexion et réfraction

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

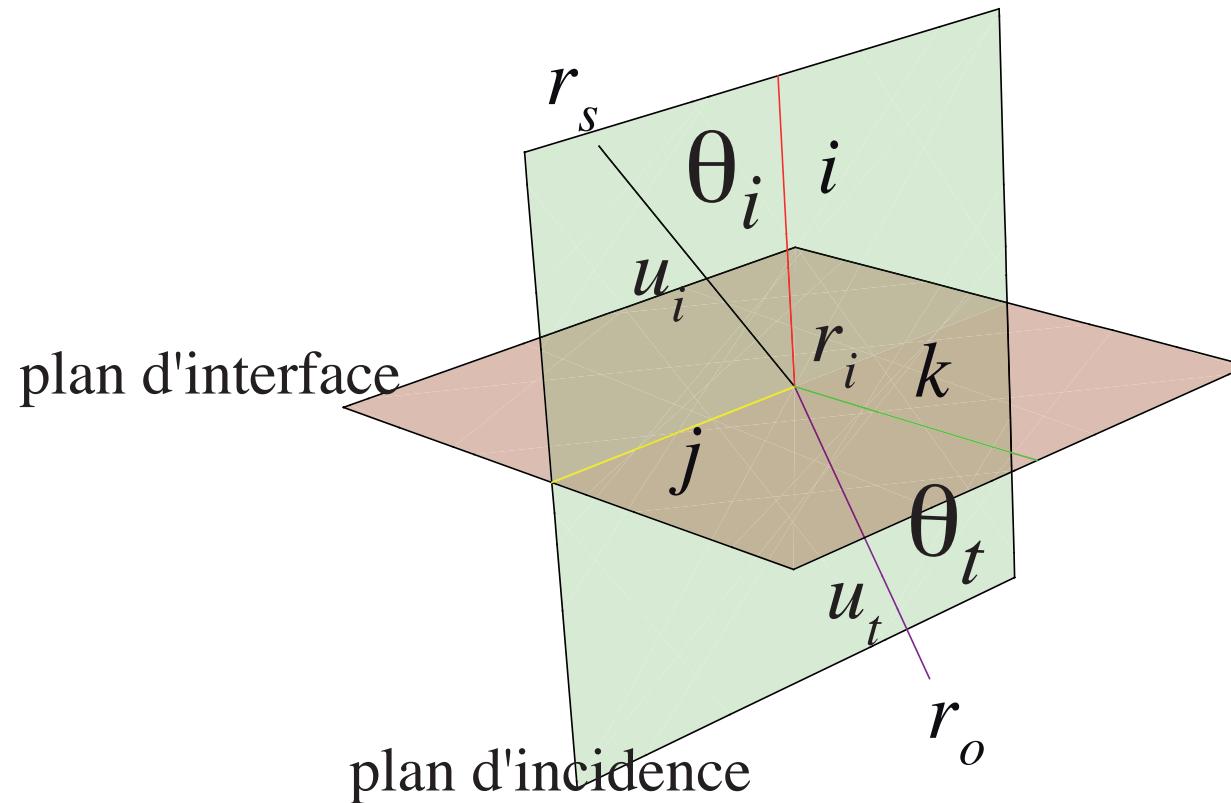
Son

Audition

Musique

Conclusions

Notation en 3-D pour la réfraction.



Réflexion et réfraction

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- Le sinus de l'angle d'incidence s_i entre \vec{u}_i et le plan d'incidence est donné par

$$s_i = \sin(\theta_i) = \vec{u}_i \cdot \vec{k}$$

- Selon la seconde loi de Snell-Descartes, le sinus de l'angle de réfraction s_t est donné par

$$s_t = \sin \theta_t = \left(\frac{c_t}{c_i} s_i \right) = \left(\frac{c_t}{c_i} \vec{u}_i \cdot \vec{k} \right)$$

Réflexion et réfraction

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- La direction de l'onde après réfraction est

$$\vec{u}_t = -\vec{i} \sqrt{1 - s_t^2} + \vec{k} s_t$$

- Notez que s_t est aussi donné par

$$s_t = \vec{u}_t \cdot \vec{k}$$

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Symétrie.

- Dans le cas où la source est à \vec{r}_o et l'observateur à \vec{r}_s , la trajectoire de la lumière s'inverse ($\vec{i}' = \vec{i}$)

$$\vec{u}'_i = -\vec{u}_t$$

$$\vec{j}' = -\vec{j}$$

$$\vec{k}' = -\vec{k}$$

$$\vec{u}'_t = -\vec{u}_i$$

Réflexion et réfraction

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

■ Cependant, en utilisant

$$s'_t = \left(\frac{c'_t}{c'_i} s'_i \right)$$

avec

$$s'_i = s_t$$

$$c'_i = c_t$$

$$s'_t = s_i$$

$$c'_t = c_i$$

on obtient toujours

$$s_t = \left(\frac{c_t}{c_i} s_i \right)$$

Réflexion et réfraction

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Commentaires concernant la seconde loi de Snell-Descartes.

$$\theta_t = \arcsin\left(\frac{c_t}{c_i} \sin \theta_i\right) = \arcsin\left(\frac{c_t}{c_i} \vec{u}_i \cdot \vec{k}\right)$$

- Comme \vec{u}_i et \vec{k} sont des vecteurs unitaires, $-1 \leq \vec{u}_i \cdot \vec{k} \leq 1$.
- Si $c_i = c_t$, toutes les valeurs de θ_i sont permises ($-\pi/2 \leq \theta_i \leq \pi/2$), et elles généreront l'ensemble des valeurs permises pour θ_t ($\pi/2 \leq \theta_t \leq \pi/2$).
- Si $c_i > c_t$ toutes les valeurs de θ_i sont permises ($-\pi/2 \leq \theta_i \leq \pi/2$), et elles généreront un ensemble restreint de valeurs pour θ_t ($-|\arcsin(c_t/c_i)| \leq \theta_t \leq |\arcsin(c_t/c_i)|$). Aucune onde pénétrant dans le second milieu ne pourra atteindre des angles $\theta_t > |\arcsin(c_t/c_i)|$ et $\theta_t < -|\arcsin(c_t/c_i)|$.

Réflexion et réfraction

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

■ Si $c_i < c_t$:

- ◆ les seules valeurs de θ_i permises sont $-|\arcsin(c_i/c_t)| \leq \theta_i \leq |\arcsin(c_i/c_t)|$;
- ◆ elles généreront un ensemble complet de valeurs pour θ_t ($-\pi/2 \leq \theta_t \leq \pi/2$) ;
- ◆ aucune onde ne peut pénétrer dans le second milieu pour $\theta_i < -|\arcsin(c_i/c_t)|$ ou $\theta_i > |\arcsin(c_i/c_t)|$;
- ◆ comme les ondes avec des angles $\theta_i < -|\arcsin(c_i/c_t)|$ et $\theta_i > |\arcsin(c_i/c_t)|$ doivent se diriger quelque part, elles seront réfléchies par la surface, même si elle est totalement transparente ;
- ◆ c'est ce phénomène qu'on appelle la réflexion totale interne.

Réflexion et réfraction

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Ces relations ont été dérivées en utilisant le principe de Fresnel (voir aussi le chapitre 9 sur l'optique). Une alternative à cette dérivation est d'utiliser le principe d'Huygens–Fresnel :

Si un point \vec{r} reçoit une onde d'amplitude $A(\vec{r}, t)$, on peut supposer qu'il réémet lui-même une onde de fréquence, amplitude et phase identiques à celles de l'onde incidente.

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

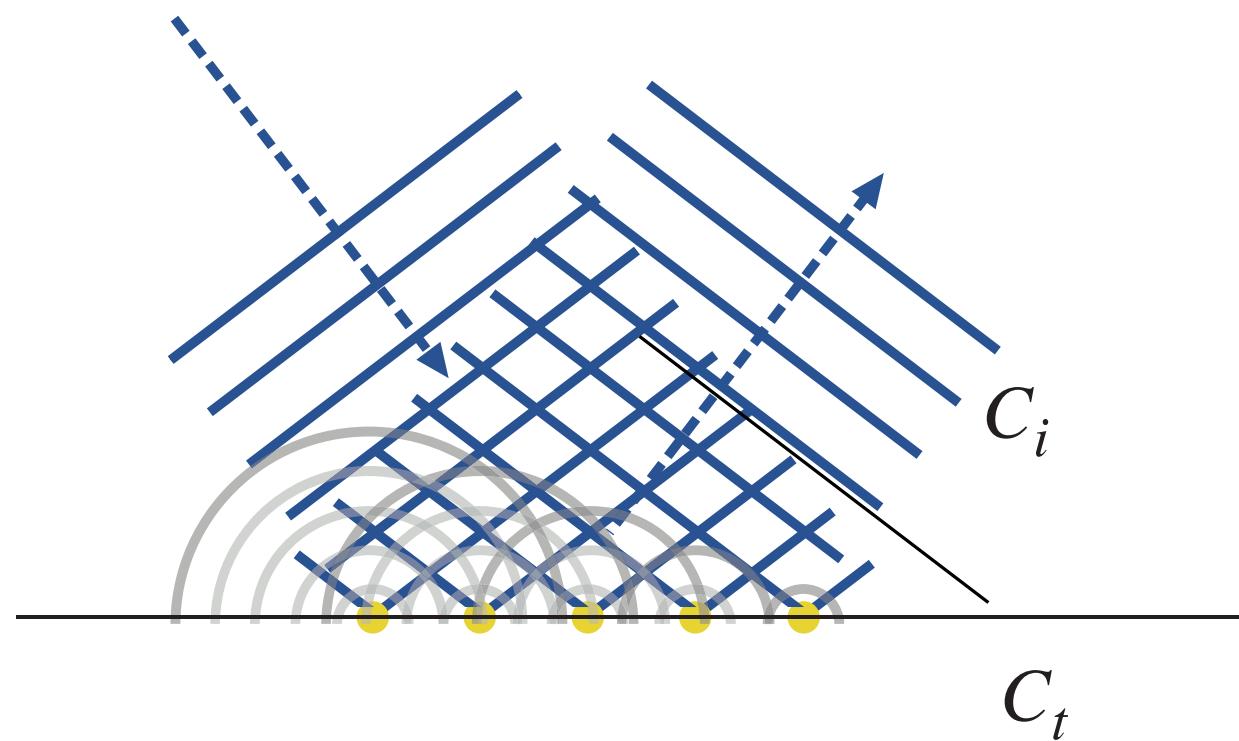
Son

Audition

Musique

Conclusions

Principe d'Huygens–Fresnel pour la réflexion.



Réflexion et réfraction

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

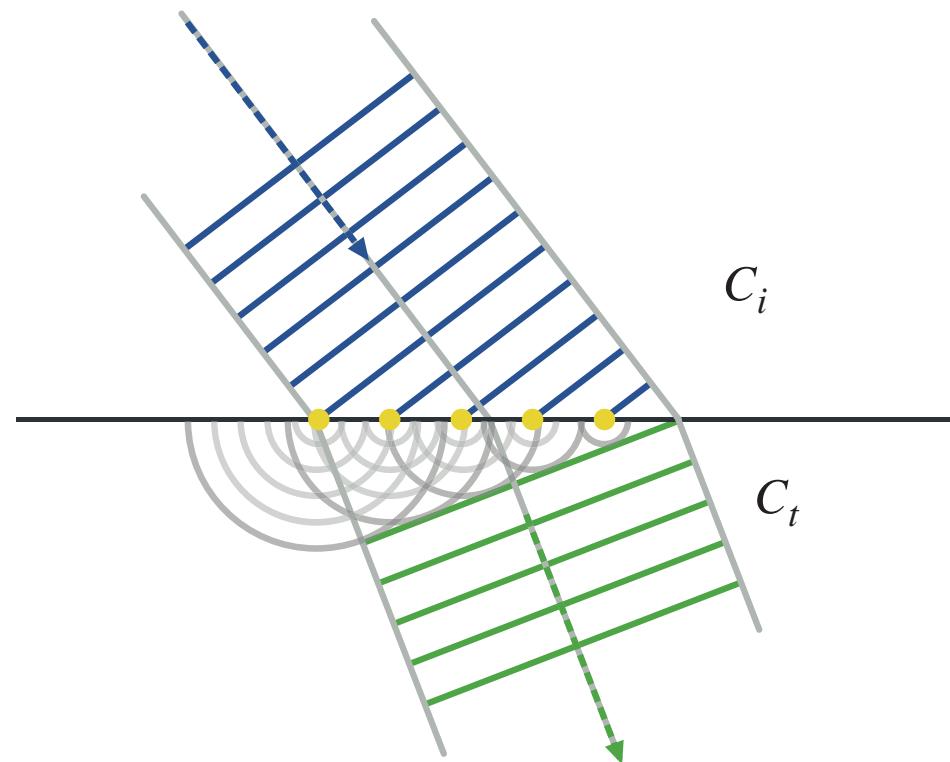
Son

Audition

Musique

Conclusions

Principe d'Huygens–Fresnel pour la réfraction.



Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Impédance acoustique

- L'impédance acoustique caractérise la résistance qu'un milieu oppose à sa mise en mouvement lorsqu'il est traversé par une onde acoustique.
- Elle est définie comme le rapport de la pression acoustique sur la vitesse locale de déplacement dans un milieu, et est généralement notée Z .
- Il faut distinguer :
 - ◆ l'impédance caractéristique d'un milieu (l'air ou l'eau) ;
 - ◆ l'impédance d'un composant acoustique (un silencieux ou un tuyau d'orgue).

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

L'impédance caractéristique d'un milieu

- L'impédance caractéristique d'un milieu (solide, liquide ou gazeux) est définie comme étant le rapport de la pression acoustique sur la vitesse de déplacement en milieu ouvert (c'est-à-dire en l'absence d'ondes réfléchies)

$$Z \propto \frac{p}{c_{\text{milieu}}}$$

avec Z en $\text{Pa} \times \text{s/m}$.

- En électromagnétisme, l'impédance est définie par

$$Z \propto \frac{V}{I}$$

et représente la résistance du milieu au déplacement des charges sous l'effet d'un potentiel V .

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- On a déjà vu que pour un gaz :

$$c_{\text{gaz}} = \sqrt{\beta \frac{p}{\rho}}$$

avec $\beta = c_p/c_v = 1.4$ pour l'air.

- L'impédance caractéristique, définie comme étant une propriété du matériel considéré, est égale au produit de la masse volumique du matériau ρ par la vitesse du son c_{milieu} dans ce même matériel

$$Z = \rho c_{\text{milieu}}$$

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- L'indice de réfraction entre deux milieux est donné par (optique)

$$n_{1,2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c_{\text{milieu 1}}}{c_{\text{milieu 2}}}$$

- Le rapport d'impédance pour deux milieux est

$$\frac{Z_1}{Z_2} = n_{1,2} \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

- Notez qu'en optique, l'onde se propage dans le vide et les densités des milieux ρ_1 et ρ_2 ne correspondent à rien de physique.

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

La masse volumique et la vitesse du son variant avec la température, c'est aussi le cas pour l'impédance acoustique de l'air.

T (C)	c (m/s)	ρ (kg/m ³)	Z (Pa × s/m)
-10	325.4	1.341	436.5
-5	328.5	1.316	432.4
0	331.5	1.293	428.3
+5	334.5	1.269	424.5
+10	337.5	1.247	420.7
+15	340.5	1.225	417.0
+20	343.4	1.204	413.5
+25	346.3	1.184	410.0
+30	349.2	1.164	406.6

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Impédance acoustique de différents matériaux.

Matériel	c (m/s)	ρ (kg/m ³)	Z MPa × s/m
Eau (20 °C)	1480	1000	1.48
Eau de mer (20 °C)	1531	1025	1.57
Huile d'olive	1445	918	1.32
Quartz	5500	2200	12.1
Acier	5790	7800	4.52
Béton	5650	2300	0.84
Plomb	2160	11400	2.46

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

L'impédance d'un composant acoustique

- On retourne à la définition originale de l'impédance
 $Z \propto p/c_{\text{milieu}}$.
- Ici, la vitesse est mesurée à l'entrée du composant et la pression acoustique à sa sortie.
- On parle alors d'impédance acoustique spécifique, puisqu'elle ne fait intervenir que des grandeurs intensives (la pression acoustique et la vitesse de déplacement).

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Connaissant la section S de la composante, il est aussi possible de définir :

- une impédance mécanique

$$Z_m = \frac{Sp}{\nu} = SZ$$

avec Sp la force exercée sur la colonne d'air ;

- une impédance hydraulique

$$Z_h = \frac{p}{S\nu} = \frac{Z}{S},$$

$S \times \nu$ étant le débit volumique acoustique à l'entrée du composant.

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- Lorsqu'une onde acoustique rencontre l'interface séparant deux milieux d'impédances acoustiques différentes, une partie de l'onde est transmise dans l'autre milieu tandis qu'une autre partie est réfléchie à l'interface.
- La notion d'impédance acoustique permet d'étudier complètement et quantitativement ce phénomène et d'estimer les quantités d'énergie acoustique transmises et réfléchies.

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

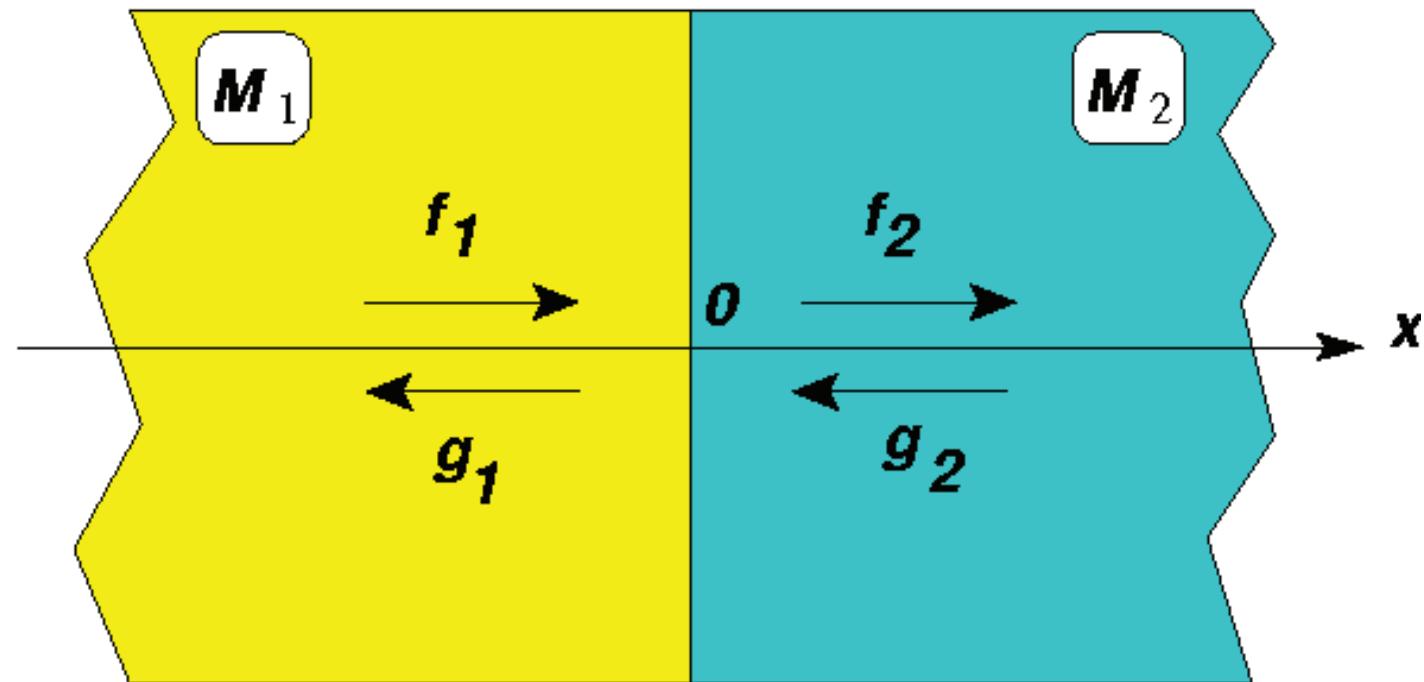
Son

Audition

Musique

Conclusions

Interface acoustique



Acoustique physique

Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Musique
Conclusions

- L'étude de la propagation des ondes à l'interface de deux milieux acoustiques peut se faire en se limitant aux ondes d'incidence normale à l'interface.
- Dans ce cas, la dynamique des fluides fournit les équations d'onde suivantes

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2}$$
$$\frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2}$$

avec

$$\rho \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} = - \frac{\partial p(x, t)}{\partial x}$$

Acoustique physique

Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Musique
Conclusions

- La vitesse v étant solution d'une équation d'onde, on peut rechercher une solution de propagation sous la forme de la somme d'une onde f dans la direction $+x$ et d'une onde g dans la direction $-x$

$$v(x, t) = f(x - ct) + g(x + ct)$$

- Sachant que la pression acoustique s'écrit elle aussi sous la forme d'une solution de propagation, on aura aussi

$$p(x, t) = h(x - ct) + k(x + ct)$$

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Cas 1 : $v(x, t) = f(x - ct)$ et $p(x, t) = h(x - ct)$.

■ En utilisant

$$\rho \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} = -\frac{\partial p(x, t)}{\partial x}$$

ou obtient

$$-\rho c f'(u) = -h'(u)$$

Cette équation sera satisfaite si

$$h(x - ct) = Zf(x - ct)$$

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Cas 2 : $v(x, t) = g(x + ct)$ et $p(x, t) = k(x + ct)$.

■ En utilisant encore

$$\rho \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} = - \frac{\partial p(x, t)}{\partial x}$$

ou obtient

$$\rho c g'(u) = -k'(u)$$

Cette équation sera satisfaite si

$$k(x + ct) = -Zg(x + ct)$$

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Finalement, on utilisera

$$v(x, t) = f(x - ct) + g(x + ct)$$

$$p(x, t) = Z(f(x - ct) - g(x + ct))$$

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Cas de deux milieux d'impédance acoustique Z_1 et Z_2 où on définit :

- f_1 et g_1 les fonctions d'onde dans le milieu 1 ;
- f_2 et g_2 les fonctions d'onde dans le milieu 2.

Alors en $x = 0$ (intersection entre les deux milieux), la condition de continuité des vitesses et des pressions s'écrit

$$v(0, t) = f_1(-ct) + g_1(ct) = f_2(-ct) + g_2(ct)$$

$$p(0, t) = Z_1 (f_1(-ct) - g_1(ct)) = Z_2 (f_2(-ct) - g_2(ct))$$

Acoustique physique

Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Musique
Conclusions

Pour une onde venant de la gauche dans le milieu 1 ($g_1 = 0$) et une onde venant de la droite dans le milieu 2 ($f_2 = 0$), on peut déduire les ondes transmises f_2 et réfléchies g_1 en utilisant

$$\begin{pmatrix} f_2 \\ g_1 \end{pmatrix} = \frac{1}{Z_1 + Z_2} \begin{pmatrix} Z_2 - Z_1 & 2Z_1 \\ 2Z_2 & Z_1 - Z_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_2 \\ f_1 \end{pmatrix}$$

Ces relations sont analogues à celles qui mèneront aux formules de Fresnel en optique que nous verrons au chapitre 9.

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Ici :

- $\frac{2Z_1}{Z_1+Z_2} = t_{12}$ est le coefficient de transmission en amplitude des ondes de 1 vers 2 ;
- $\frac{Z_1-Z_2}{Z_1+Z_2} = r$ est le coefficient de réflexion en amplitude des ondes venant de 1 à l'interface ;
- $\frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2} = -r$ est le coefficient de réflexion en amplitude des ondes venant de 2 à l'interface ;
- $\frac{2Z_2}{Z_1+Z_2} = t_{21}$ est le coefficient de transmission en amplitude des ondes de 2 vers 1.

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Trois cas sont d'intérêt particulier :

- $Z_2/Z_1 = 0$ et $r = 1$ pour une onde parfaitement réfléchie ;
- $Z_2/Z_1 = 1$ et $t_{12} = 1$ pour une onde transmise complètement ;
- $Z_2/Z_1 = \infty$ et $r = -1$ pour une onde parfaitement réfléchie avec changement de phase.

Acoustique physique

Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Musique
Conclusions

- La densité de puissance d'une onde acoustique suivant une direction est donnée dans le cas général par

$$P(x, t) = p(x, t) \nu(x, t) = Z(x) \nu^2(x, t)$$

- Le coefficient de réflexion de puissance exprime la quantité d'énergie contenue dans l'onde g_1 , étant donné une onde incidente f_1

$$R = \frac{P(x < 0, t > 0)}{P(x < 0, t < 0)} = r^2 = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- Le coefficient de transmission énergétique exprime la quantité d'énergie contenue dans l'onde transmise f_2 , étant donnée une onde incidente f_1

$$T = \frac{P(x > 0, t > 0)}{P(x < 0, t < 0)} = \frac{Z_2 t_{12}^2}{Z_1} = \frac{4 Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

Acoustique physique

Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Musique
Conclusions

- Notez que la conservation d'énergie implique

$$R + T = 1$$

- Les coefficients de réflexion et de transmission énergétiques sont souvent exprimés en décibel

$$R(dB) = 10 \log(R)$$

$$T(dB) = 10 \log(T)$$

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Interface air-eau.

- Si l'on considère l'interface entre l'air ($Z_1 = 430 \text{ Pa} \times \text{s/m}$) et l'eau ($Z_2 = 1.5 \text{ MPa} \times \text{s/m}$), on trouve des coefficients de réflexion et transmission

$$R = -0.005 \text{ dB}$$

$$T = -30 \text{ dB}$$

- Les sons ne se transmettent presque pas d'un milieu à l'autre.
- L'eau se comporte dans ce cas comme un réflecteur presque parfait.

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

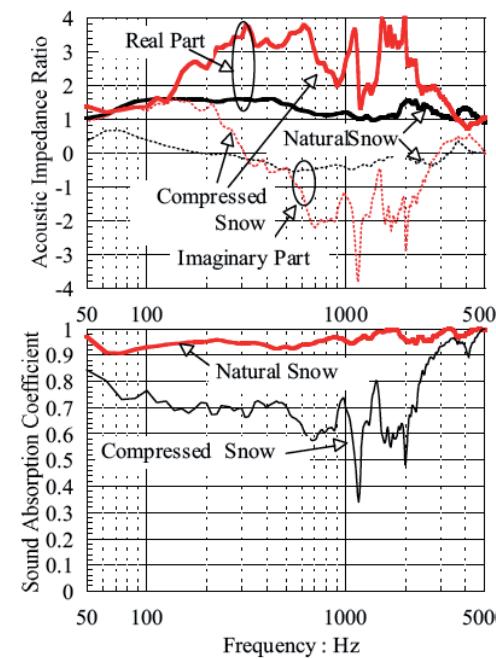
Son

Audition

Musique

Conclusions

Neige



On peut comparer cet effet avec une surface de béton qui réfléchit plus de 99 % du son.

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Interférence

- L'interférence est le résultat de la combinaison linéaire de deux ondes et plus, ces ondes étant de même type (ondes sonores, ondes lumineuses).
- En fait, on parle surtout de patrons d'interférence lorsque deux ondes sont totalement ou partiellement corrélées, c'est-à-dire qu'elles proviennent de sources à peu près identiques.

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- On obtient les patrons d'interférence en utilisant le principe de superposition des ondes :
 - ◆ la fonction associée à la superposition d'ondes à un point donné est égale à la somme vectorielle des différentes fonctions qui décrivent les ondes individuelles à ce même point.
- Si les maxima de deux ondes se combinent, on aura une interférence constructive.
- Si un maximum et un minimum de chaque onde se combinent, on aura une interférence destructive.

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

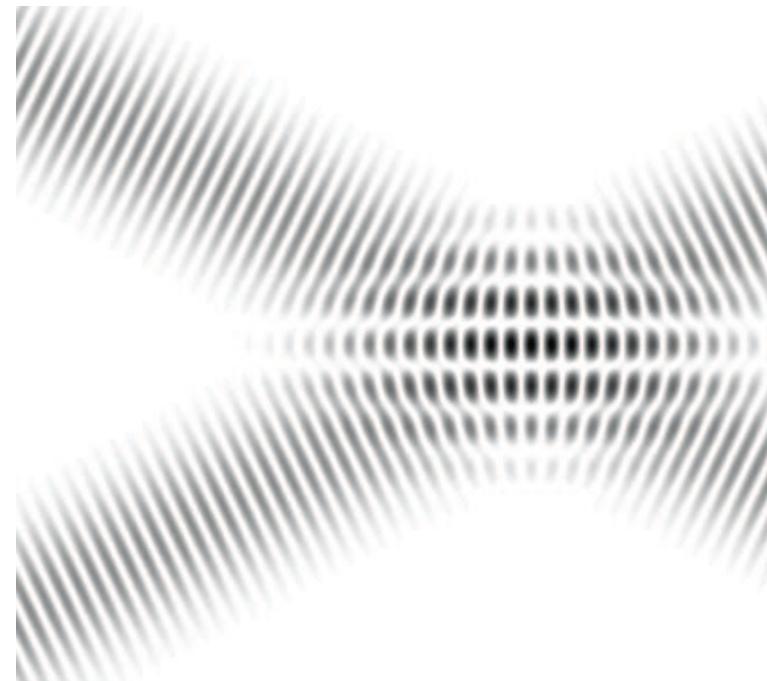
Son

Audition

Musique

Conclusions

Interférence d'ondes planes



Réflexion et réfraction

Acoustique physique

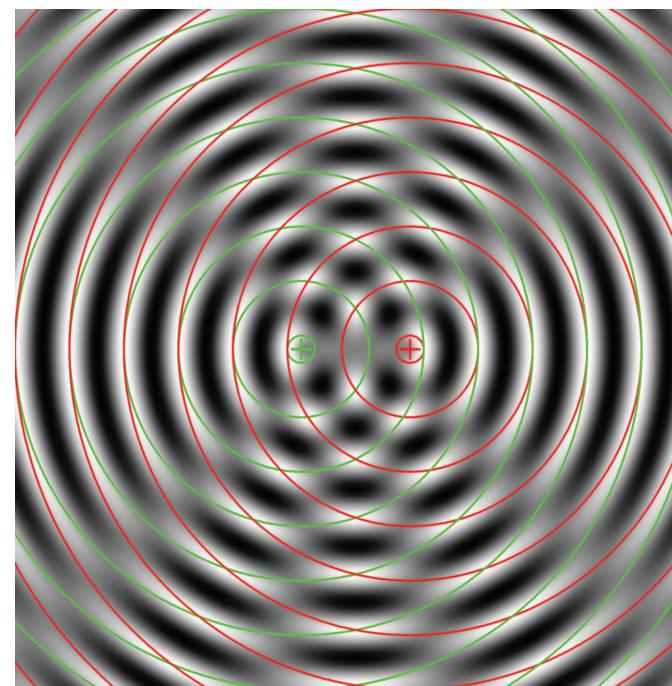
Son

Audition

Musique

Conclusions

Interférence d'ondes radiales



Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Modélisation de l'effet d'interférence.

- Chaque onde i est représentée par une fonction $A_i(\vec{r}, t)$.
- La combinaison de ces ondes donne

$$A(\vec{r}, t) = \sum_{i=1}^N A_i(\vec{r}, t)$$

- Deux cas sont d'intérêt particulier en acoustique physique :
 - ◆ l'interférence de deux ondes ayant la même fréquence ;
 - ◆ l'interférence de deux ondes ayant des fréquences légèrement différentes (le battement).

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Deux ondes sonores planes de même fréquence ν se déplaçant dans la direction \vec{u}_1 et \vec{u}_2 .

- Chaque onde i est représentée par

$$p_i(\vec{r}, t) = A_i \sin\left(\frac{2\pi(\vec{r} \cdot \vec{u}_i)}{\lambda} - 2\pi\nu t\right)$$

- La pression au point \vec{r} sera alors

$$\begin{aligned} p(\vec{r}, t) &= A_1 \sin\left(\frac{2\pi(\vec{r} \cdot \vec{u}_1)}{\lambda} - 2\pi\nu t\right) \\ &\quad + A_2 \sin\left(\frac{2\pi(\vec{r} \cdot \vec{u}_2)}{\lambda} - 2\pi\nu t\right) \end{aligned}$$

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- On peut simplifier l'analyse en choisissant un point \vec{r} fixe dans l'espace (position de l'auditeur)

$$p(t) = A_1 \sin(\phi_1 - 2\pi\nu t) + A_2 \sin(\phi_2 - 2\pi\nu t)$$

- Ici on a défini

$$\phi_i = \frac{2\pi(\vec{r} \cdot \vec{u}_i)}{\lambda}$$

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

■ En utilisant

$$\sin(a - b) = \sin(a)\cos(b) - \cos(a)\sin(b)$$

nous allons tenter de représenter l'onde résultante au point \vec{r} sous la forme

$$p(t) = A \sin(\varphi - 2\pi\nu t)$$

■ On obtient alors

$$A = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{A_1 \sin \phi_1 + A_2 \sin \phi_2}{A_1 \cos \phi_1 + A_2 \cos \phi_2}\right)$$

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- Si les ondes sont en phase ($\phi_1 = \phi_2$), on obtient

$$A = \pm(A_1 + A_2)$$

et on a une interférence constructive.

- Si les ondes sont hors phase par π ($\phi_1 - \phi_2 = \pi$) on obtient

$$A = \pm(A_1 - A_2)$$

et on a une interférence destructive.

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- Si deux ondes de même amplitude sont déphasées de π on aura

$$A = 0$$

Le signal au point \vec{r} est alors nul (aucun son perçu par l'auditeur à cette position).

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Battement

- Le battement est une perception sonore due au mélange de deux sons, de fréquences fondamentales voisines, ou contenant des fréquences harmoniques voisines.
- Au lieu d'entendre un son composé de deux signaux, l'oreille perçoit plutôt une fréquence moyenne agrémentée d'un battement dont la fréquence est la différence de fréquence entre les deux sons.

Acoustique physique

Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Musique
Conclusions

Considérons deux ondes sonores planes de même intensité et de fréquences ν_1 et ν_2 se déplaçant dans la même direction (on supposera encore que le point d'audition est $\vec{r} = 0$).

- Chaque onde i est représentée par

$$p_i(t) = A \sin(2\pi\nu_i t)$$

- La pression totale sera alors donnée par

$$p(t) = A (\sin(2\pi\nu_1 t) + \sin(2\pi\nu_2 t))$$

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

■ En utilisant

$$\sin(a) + \sin(b) = 2 \sin\left(\frac{a+b}{2}\right) \cos\left(\frac{a-b}{2}\right)$$

■ On obtient

$$p(t) = 2A \sin\left(\frac{2\pi(\nu_1 + \nu_2)t}{2}\right) \cos\left(\frac{2\pi(\nu_1 - \nu_2)t}{2}\right)$$

■ On aura donc une onde de fréquence $(\nu_1 + \nu_2)/2$ élevée et une onde de fréquence $(\nu_1 - \nu_2)/2$ basse qui correspond au battement.

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

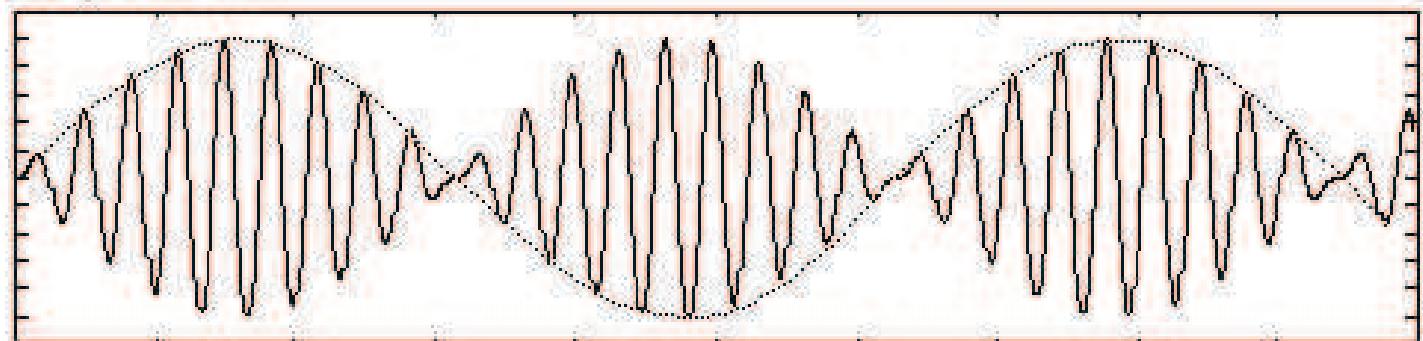
Musique

Conclusions

Battements

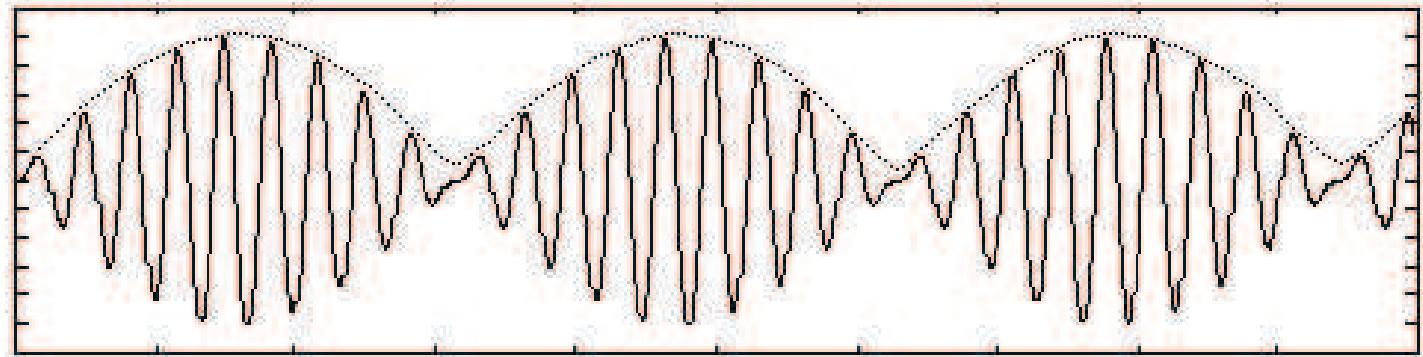
mathématiquement

$$\frac{|f_1 - f_2|}{2}$$



perceptivement

$$|f_1 - f_2|$$



Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Diffraction

- La diffraction est le comportement des ondes lorsqu'elles rencontrent un obstacle partiellement transparent.
- Plus la longueur d'onde est grande par rapport aux dimensions d'un obstacle, plus cette onde subira de diffraction et aura de facilité à contourner, à envelopper l'obstacle.
- On peut simuler cet effet en utilisant le principe d'Huygens-Fresnel.

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

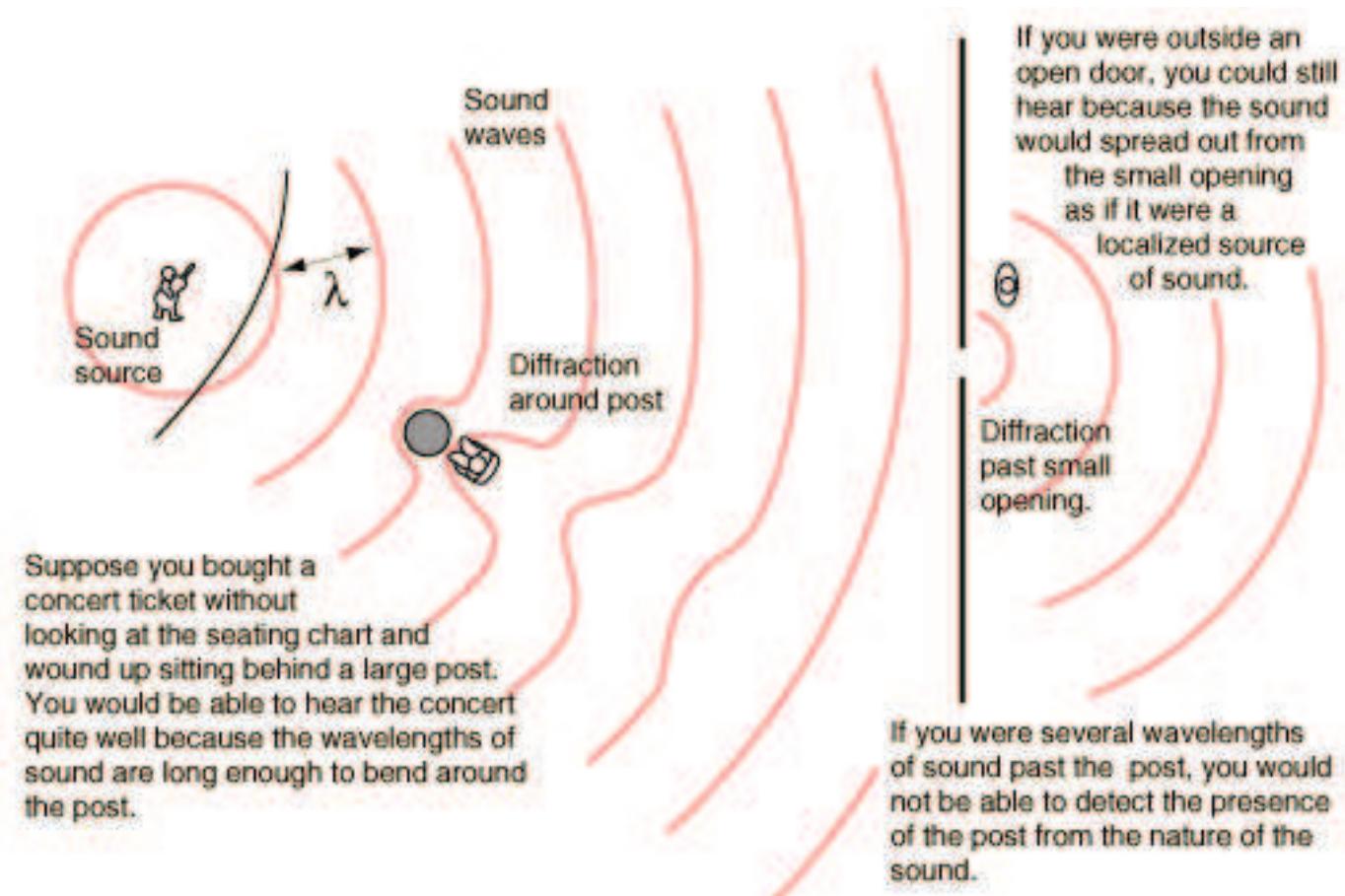
Son

Audition

Musique

Conclusions

Diffraction des ondes sonores



Réflexion et réfraction

Acoustique physique

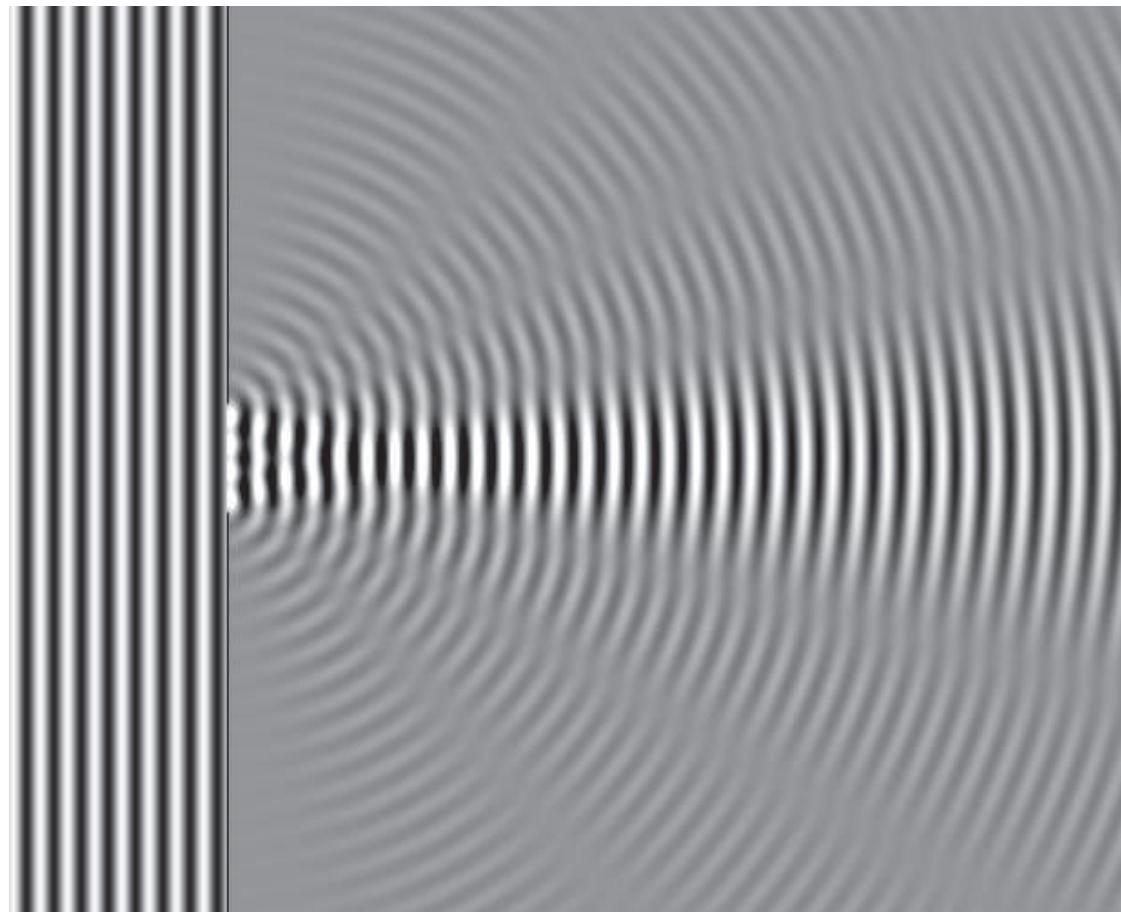
Son

Audition

Musique

Conclusions

Diffraction par une fente



Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

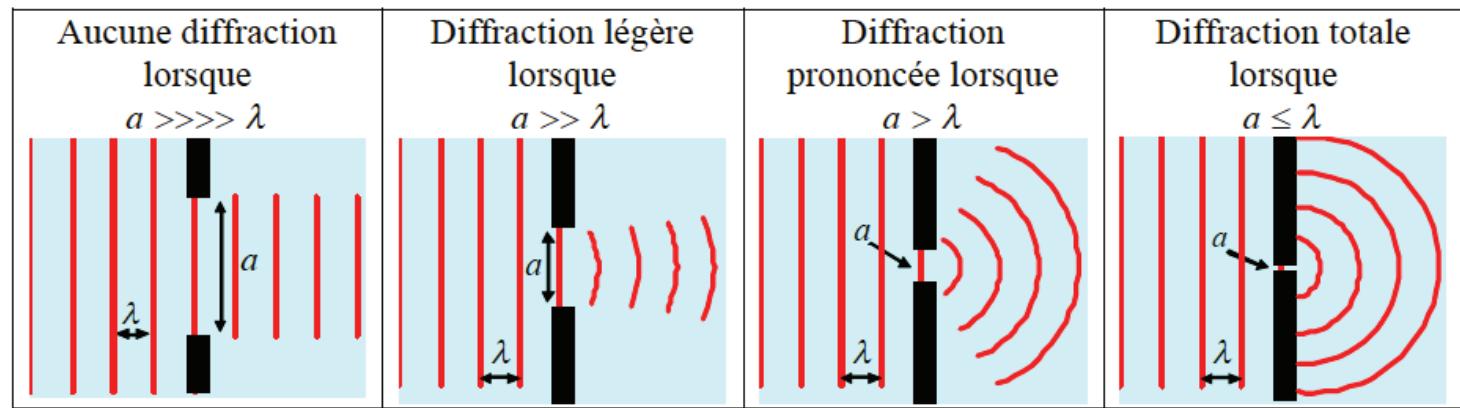
Musique

Conclusions

Diffraction par une fente de largeur d :

- si la fente est beaucoup plus large que la longueur d'onde, on aura un comportement de type rayon (aucune diffraction) et le son continuera en ligne droite ;
- si la fente est beaucoup plus étroite que la longueur d'onde, on aura le même comportement que pour une source ponctuelle et la fente se comportera comme une source d'onde ;
- si la fente a des dimensions de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, on aura un patron d'interférence.

Conditions de diffraction



Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Diffraction d'ondes sonores par une fente étroite ($d \approx \lambda$).

- Les minimums seront localisés à des angles θ_n satisfaisants

$$\theta_n = \arcsin\left(\frac{n\lambda}{d}\right)$$

avec n un entier.

- Il est très difficile de prédire de façon générale l'intensité des maxima.

Acoustique physique

Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Musique
Conclusions

- Cependant, si on suppose que l'auditeur est très loin de la fente, on peut utiliser les intégrales de Fraunhofer pour obtenir

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin(\pi d \sin \theta / \lambda)}{\pi d \sin \theta / \lambda} \right)^2$$

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

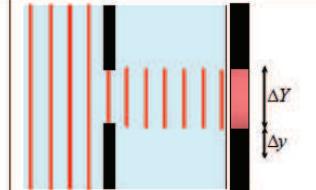
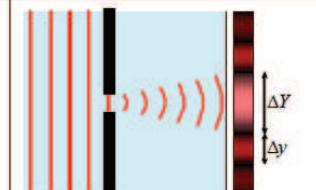
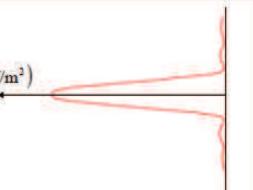
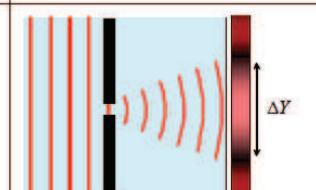
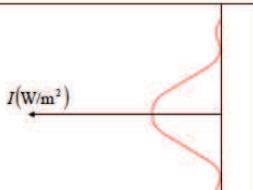
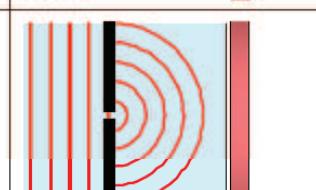
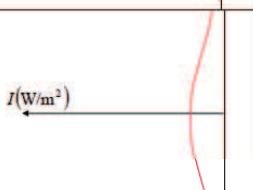
Son

Audition

Musique

Conclusions

Patron de diffraction

Type de diffraction et taille de l'ouverture a	Patron de la diffraction	Répartition de la puissance lumineuse ou intensité lumineuse
Aucune diffraction $a \gg \lambda$		
Diffraction légère $a > \lambda$		
Diffraction prononcée $a > \lambda$		
Diffraction complète $a \leq \lambda$		

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- Le processus de diffraction s'applique aussi lorsque ce sont des objets qui obstruent le passage de l'onde.
- Encore une fois, c'est la dimension de l'objet par rapport à la longueur d'onde qui dictera le patron de diffraction.

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Diffraction par un objet de largeur d :

- si l'objet est beaucoup plus grand que la longueur d'onde, on aura un comportement de type rayon (aucune diffraction) et le son continuera en ligne droite (comportement identique aux rayons de lumière) ;
- si l'objet est beaucoup plus petit que la longueur d'onde il aura peu d'impact sur l'onde et deviendra transparent au passage de l'onde ;
- si l'objet a des dimensions de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, on aura un patron d'interférence qui apparaîtra à l'arrière de l'objet et qui s'atténuera à mesure qu'on s'éloignera de celui-ci.

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

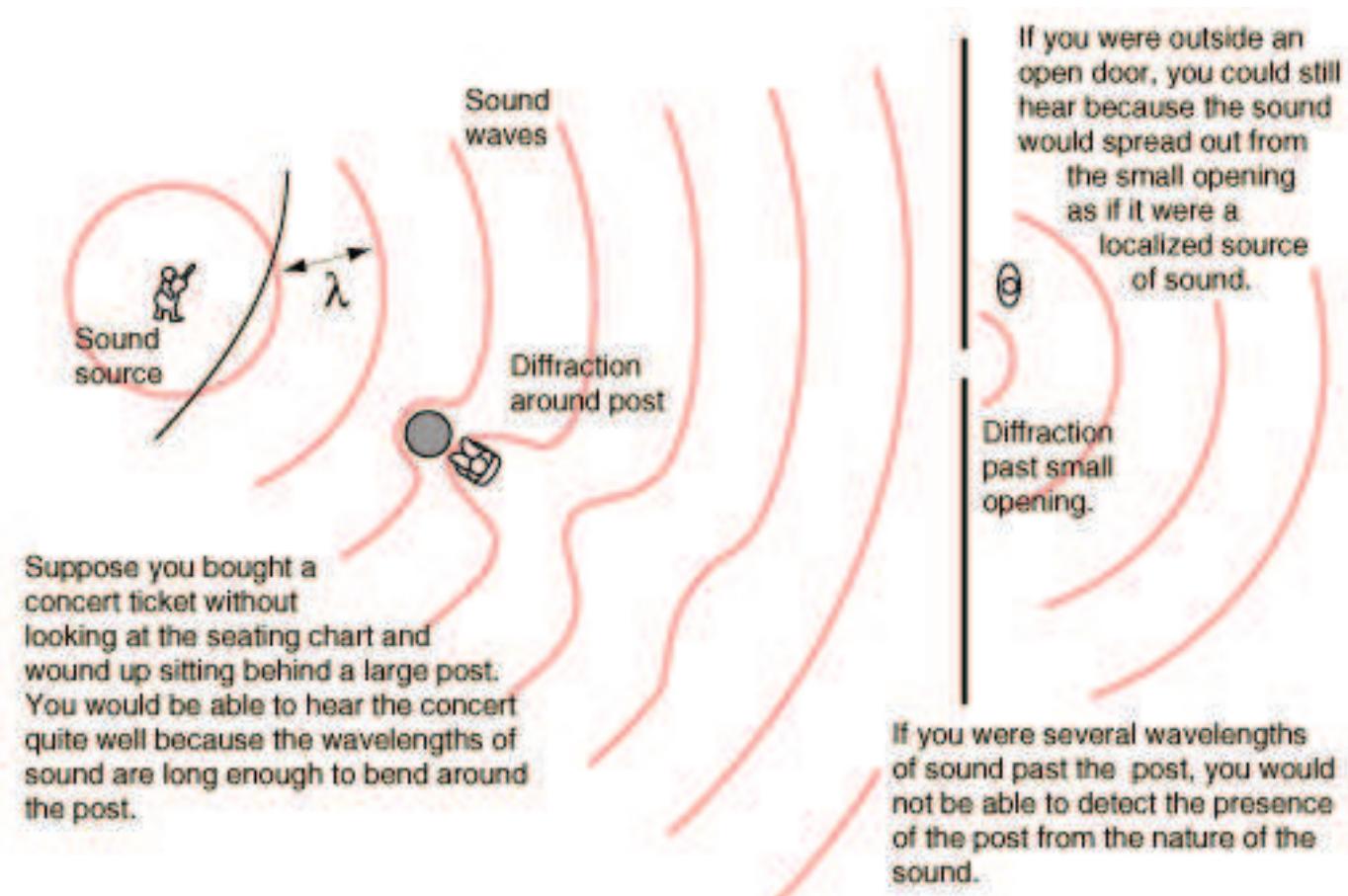
Son

Audition

Musique

Conclusions

Diffraction des ondes sonores



Réflexion et réfraction

Acoustique physique

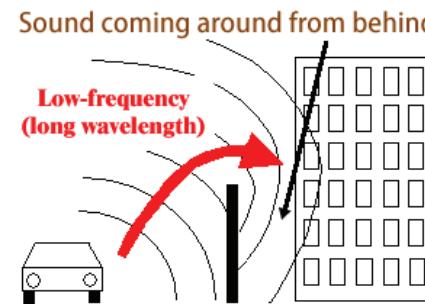
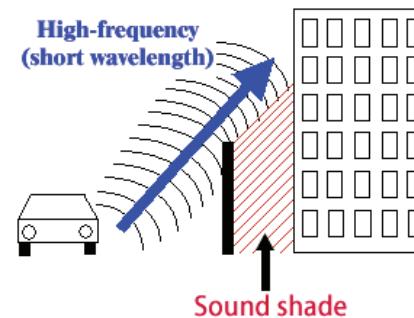
Son

Audition

Musique

Conclusions

Barrière sonore



Réflexion et réfraction

Acoustique physique

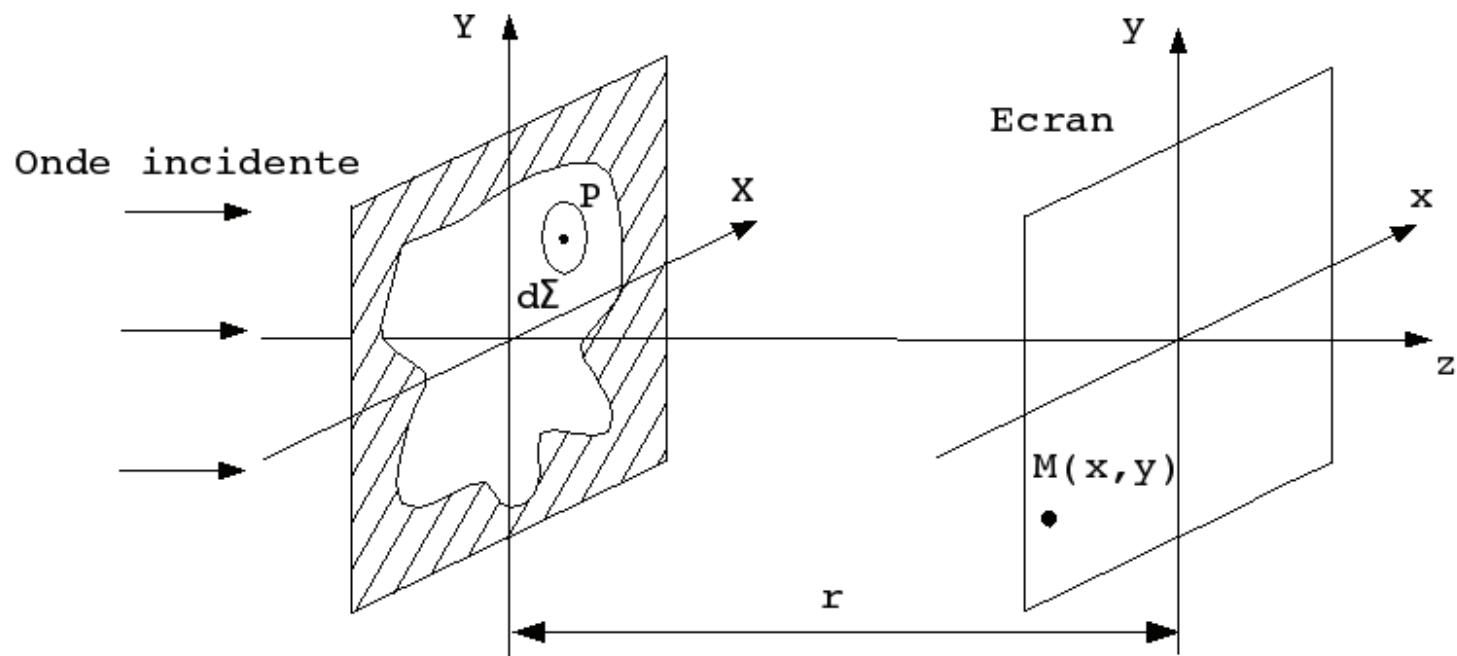
Son

Audition

Musique

Conclusions

Analyse de la diffraction



Acoustique physique

Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Musique
Conclusions

- On supposera que chaque point (X, Y) dans le plan Σ donne naissance à une onde sphérique d'intensité constante A .
- La pression p au point (x, y) due à une source au point (X, Y) est donnée par

$$p_{X,Y}(x, y) = \frac{A}{R} \sin\left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right) = \frac{A}{r} \sin(kR)$$

avec

$$R = \sqrt{r^2 + (x - X)^2 + (y - Y)^2}$$

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- La pression totale au point (x, y) due à l'ensemble des ondes est donnée par

$$p(x, y) = \int_{\Sigma} \frac{A}{R} \sin(kR) dXdY$$

Acoustique physique

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- Cas où $R \approx r$ (ouverture faible)

$$R = r + \frac{1}{2}((x - X)^2 + (y - Y)^2)$$

- On obtient alors la transformation de Fresnel

$$p(x, y) = \frac{A}{r} \int_{\Sigma} \sin\left(\frac{k}{r}((x - X)^2 + (y - Y)^2)\right) dX dY$$

Acoustique physique

Réflexion et réfraction
 Acoustique physique
 Son
 Audition
 Musique
 Conclusions

- Si $r \rightarrow \infty$ (ondes planes au point d'observation) on obtient

$$p(x, y) = \frac{A}{r} \sin\left(\frac{k(x^2 + y^2)}{r}\right) \int_{\Sigma} \sin\left(\frac{k(X^2 + Y^2)}{r}\right) dX dY$$

- Pour une ouverture carrée de dimensions $a \times b$, on obtient

$$I(x, y) \propto |p(x, y)|^2 = I_0 \frac{\lambda^4 r^4}{\pi^4 x^2 a^2 y^2 b^2} \sin^2\left(\frac{\pi x a}{\lambda r}\right) \times \sin^2\left(\frac{\pi y b}{\lambda r}\right)$$

Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son

Audition
Musique
Conclusions

- Nous avons déjà défini le son comme étant une onde de pression qui se propage dans un fluide ou un solide.
- La vitesse de propagation du son dépend principalement de la densité et de la température du milieu

$$c = \sqrt{\beta p / \sqrt{\rho}} = 1 / \sqrt{\rho \chi}$$

où ρ est la densité du gaz et χ sa compressibilité.

- La vitesse du son diminue lorsque la densité du gaz augmente (effet d'inertie) et lorsque sa compressibilité (son aptitude à changer de volume sous l'effet de la pression) augmente.

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Propagation du son

- Seule l'onde de compression se déplace et non les molécules d'air, si ce n'est de quelques micromètres (un son intense ne peut vous décoiffer).
- Le son se propage également dans les solides sous forme de vibrations des atomes appelées phonons.
- Là encore, seule la vibration se propage, et non les atomes qui ne font que vibrer très faiblement autour de leur position d'équilibre.

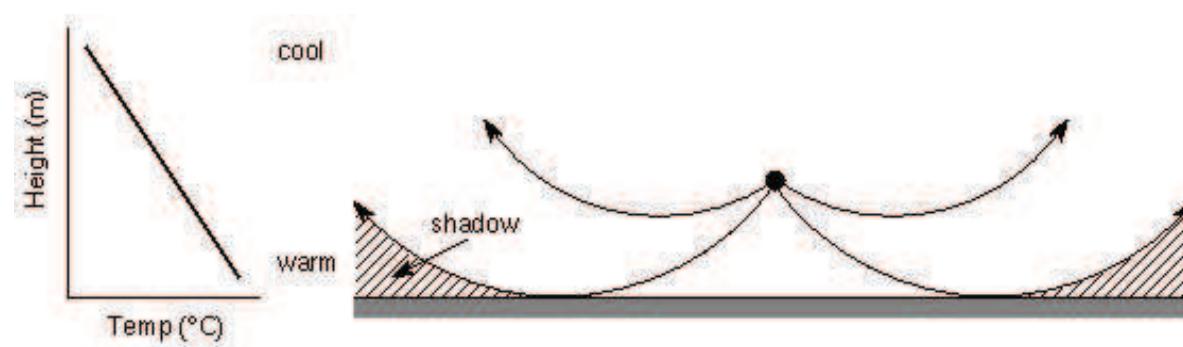
- Pour le son dans l'air, il est donc nécessaire de connaître la structure thermique de la masse d'air traversée ainsi que la direction du vent, car :
 - ◆ le son se propage moins bien à l'horizontale que sous des angles montants à cause du changement de densité (cette propriété est prise en compte dans la conception des théâtres en plein air) ;
 - ◆ l'atténuation est nettement moins forte sous le vent (régime peu turbulent) ;
 - ◆ le son peut être littéralement porté par une inversion de température et il est possible d'entendre un train à 5 km d'une voie ferrée sous le vent malgré les obstacles.

Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son

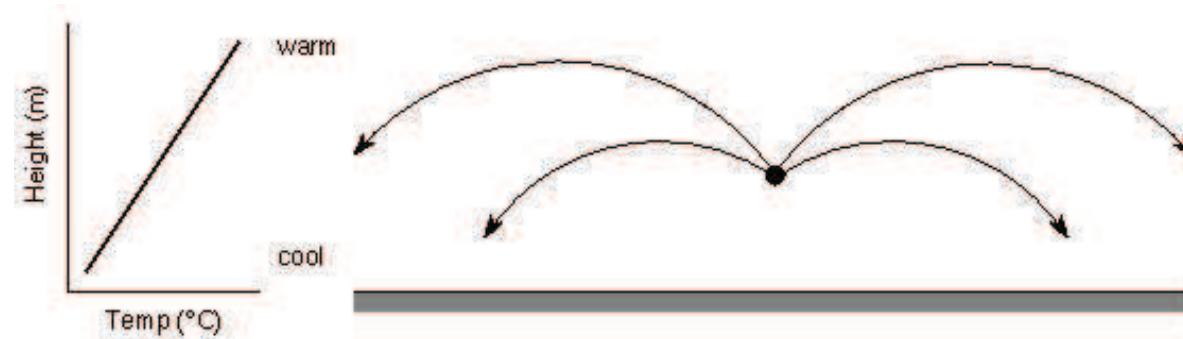
Audition
Musique
Conclusions

Effet d'un gradient de température sur la propagation du son

Cas standard.



Inversion de température.



Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

Audition

- L'audition est le fruit d'un mécanisme complexe assuré par les deux oreilles pour permettre la perception d'ondes sonores qui se propagent dans l'air avec des fréquences variant entre 20 Hz et 20 kHz.
- Par extension, le son désigne aussi la perception auditive de cette onde.

Seuils d'audition humaine

- L'oreille humaine moyenne ne perçoit que les sons situés entre 20 Hz et 20 kHz.
- Deux seuils sont également importants pour l'ouïe :
 - ◆ le seuil temporel de reconnaissance de la hauteur (10 ms) donnant la durée minimale d'un son détectable ;
 - ◆ le temps d'intégration de l'oreille (50 à 100 ms) représentant le temps requis pour détecter la fréquence et l'intensité d'un son.
- Pour des signaux plus courts, le signal est perçu comme un claquement.

Audition

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- Tout être vivant doté d'une ouïe ne peut percevoir qu'une partie du spectre sonore :
 - ◆ l'oreille humaine moyenne ne perçoit les sons que dans une plage de fréquences située entre 20 Hz (en dessous, les sons sont qualifiés d'infrasons) et 20 kHz (au-delà, les sons sont qualifiés d'ultrasons) ;
 - ◆ cette gamme de fréquences varie avec l'âge, la culture, etc. ;
 - ◆ le chat peut percevoir des sons jusqu'à 25 kHz ;
 - ◆ le chien perçoit les sons jusqu'à 35 kHz ;
 - ◆ la chauve-souris et le dauphin peuvent percevoir les sons de fréquence 100 kHz.

Audition

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Conclusions

- Certains animaux utilisent leur aptitude à couvrir une large bande de fréquences à des fins diverses :
 - ◆ les éléphants utilisent les infrasons pour transmettre des informations à plusieurs kilomètres de distance ;
 - ◆ les dauphins communiquent grâce aux ultrasons ;
 - ◆ les chauves-souris émettent des ultrasons (≈ 80 kHz) qui combinés avec leur système d'écholocalisation leur permettent de se déplacer et de chasser dans le noir total.

Musique

Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Musique
Conclusions

La gamme de son musical perceptible à l'oreille humaine est divisée en 8 octaves (≈ 70 Hz à ≈ 17 kHz) ;

- une octave correspond à un intervalle de fréquence $[\nu, 2\nu]$;
- chaque octave est sous-divisée en 12 intervalles à peu près égaux dont les limites correspondent aux notes (7) b mol et dièses ;
- plusieurs types de gammes existent (tempérée, Pythagore, juste intonation) et elles peuvent être associées à des fréquences de référence différentes (DO à 264 Hz ou LA à 440 Hz).

Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Musique
Conclusions

Octaves (DO à 264 Hz)

Octave	ν_{\min} (Hz)	ν_{\max} (Hz)
1	66	132
2	132	264
3	264	528
4	528	1056
5	1056	2112
6	2112	4224
7	4224	8448
8	8448	16896

Musique

Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Musique
Conclusions

Notes dans l'octave 3 et 4 pour la gamme «juste intonation»

Note	Octave 3 (ν en Hz)	Octave 4 (ν en Hz)
DO	264	528
RÉ	297	594
MI	330	660
FA	352	704
SOL	396	792
LA	440	880
SI	495	990

Les diapasons sont basés sur le LA à 440 Hz.

Notes dans l'octave 3 pour la gamme <tempérée>

Note	Octave 3 (ν en Hz)	ton
DO	261.63	1
RÉ	293.66	3
MI	329.63	5
FA	349.25	6
SOL	392.00	8
LA	440.00	10
SI	493.88	12

Dans cette gamme les fréquences sont données par

$$\nu = \nu_{\text{ref}} \times 2^{(\text{octave}-3) + \frac{\text{ton}-10}{12}}$$

Musique et timbre

- Le timbre d'un son est en quelque sorte la couleur propre de ce son.
- Il varie en fonction de la source sonore indépendamment de sa fréquence, son intensité et sa durée.
- Du point de vue de l'acoustique, le timbre dépend de la corrélation entre la fréquence fondamentale, et les harmoniques (une fréquence multiple de la fréquence fondamentale).

Musique

Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Musique
Conclusions

- L'intensité respective de chaque harmonique est déterminante dans la caractérisation du timbre.
- Plus les fréquences de ces harmoniques sont proches des multiples entiers de la fréquence fondamentale, plus le son est pur ou harmonique (clavecin).
- Plus elles s'éloignent des multiples entiers, plus le son est anharmonique (piano, cloche).

Conclusions

Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Musique
Conclusions

Dans le prochain chapitre, nous étudierons l'optique :

- Description de la lumière
- Réflexion et réfraction
- Reconstitution d'images
- Réflexion diffuse et absorption
- Ombres