



PHS 4700
Physique pour les applications multimédia

Chapitre 8 — Acoustique

G. Marleau

Automne 2018

Table des matières

Ondes sonores
Effet Doppler
Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Conclusions

Ondes sonores
Effet Doppler
Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Conclusions

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Les ondes de pression

- Ici, nous étudierons les ondes de pression dans un fluide compressible (un gaz) à partir des équations de Navier-Stokes.
- Ces ondes de pression dans l'air donnent naissance à ce que notre appareil auditif détecte comme des sons (ondes sonores).

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Équations de la dynamique des fluides (rappel)

■ Équation de conservation de l'énergie

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho e \vec{v}) = -\vec{\nabla} \cdot (p \vec{v}) + \vec{\nabla} \cdot (\boldsymbol{\tau} \vec{v}) + \rho \vec{f} \cdot \vec{v} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q}$$

■ Équation de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \rho (\vec{v} \vec{v}^T) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \boldsymbol{\tau} + \rho \vec{f}$$

■ Équation de conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v})$$

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

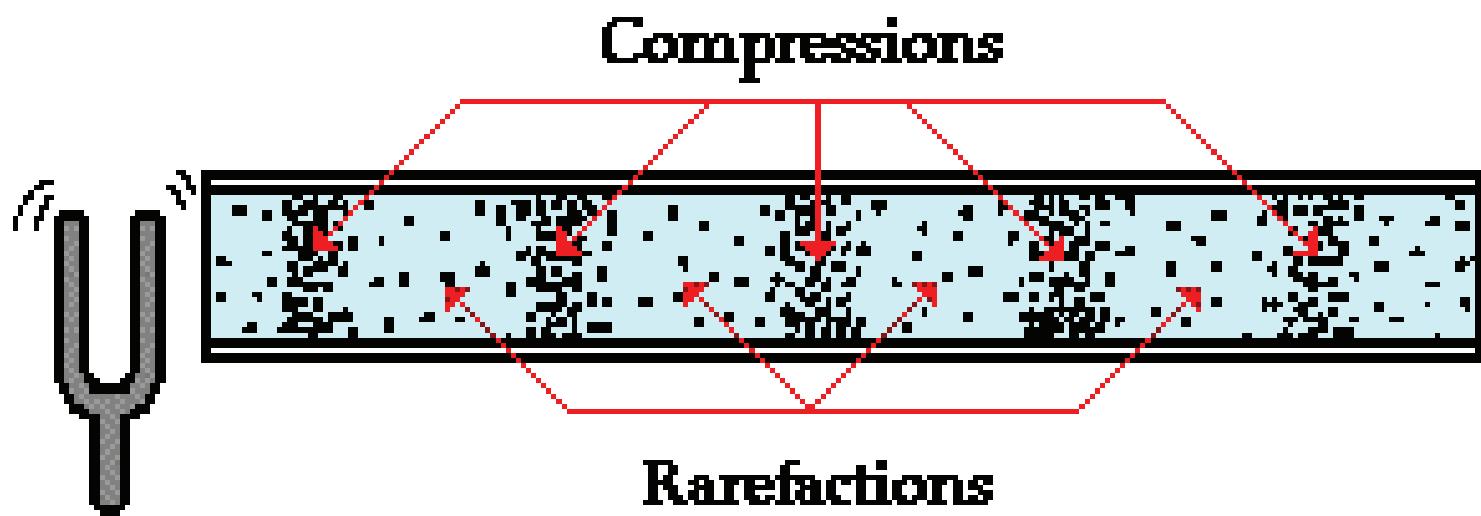
Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Ondes de pression.



Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Dérivation.

- Pour un gaz parfait, l'équation d'état est

$$p = \frac{\rho RT}{M} = \gamma \rho$$

où γ est fonction de la température.

- Pour un processus adiabatique (sans échange de chaleur) on supposera que γ est constant et on peut écrire

$$\gamma = \frac{\partial p}{\partial \rho}$$

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

On supposera que la pression p et la densité ρ du gaz varieront autour de valeurs d'équilibre p_0 et ρ_0 lors du passage de l'onde.

- On définit s la variation relative de la masse volumique par rapport à ρ_0

$$s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$$

et donc $\rho = \rho_0(1 + s)$.

- Une expansion de p au premier ordre en ρ donne alors

$$p = p_0 + \frac{\partial p}{\partial \rho}(\rho - \rho_0) = p_0 + \gamma \rho_0 s = p_0 + \tilde{p}$$

avec $\tilde{p} = \gamma \rho_0 s$ la pression exercée par l'onde.

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- L'équation de conservation de masse en 1-D donne

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho_0 \frac{\partial(1+s)}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial((1+s)v)}{\partial x}$$

- Si on admet que le terme s était négligeable par rapport à 1 on obtient alors

$$\frac{1}{\gamma \rho_0} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} = - \frac{\partial v}{\partial x}$$

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- L'équation de conservation de la quantité de mouvement peut s'écrire (en utilisant $p = p_0 + \tilde{p}$ et $\rho = \rho_0(1 + s)$ et en ne conservant que les termes dominants on obtient)

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x}$$

(Pas de forces externes ni de frottement visqueux).

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

On peut ensuite combiner l'équation de conservation de masse et de quantité de mouvement en prenant la dérivée de la première par rapport à t et de la seconde par rapport à x et en éliminant le terme vitesse v

$$\frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial t^2} = \gamma \frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial x^2}$$

qui est l'équation pour une onde dont la vitesse c est donnée par

$$c = \sqrt{\gamma}$$

en se rappelant que \tilde{p} est la différence de pression entre l'onde (p) et le milieu (p_0).

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Si on élimine \tilde{p} au lieu de ν des équations de conservation on obtient plutôt

$$\frac{\partial^2 \nu}{\partial t^2} = \gamma \frac{\partial^2 \nu}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 \nu}{\partial x^2}$$

qui est aussi une équation d'onde de vitesse c donnée par

$$c = \sqrt{\gamma}$$

les vitesses des molécules ont donc aussi un comportement ondulatoire.

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- On utilise généralement

$$c_{\text{gaz}} = \sqrt{\frac{c_p \cdot p}{c_v \rho}} = \sqrt{\frac{\beta \cdot p}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{\beta \cdot p_0}{\rho_0}}$$

où c_p et c_v sont les capacités thermiques massiques à pression et volume constants. Pour l'air $\beta = c_p/c_v = 1.4$ et on a supposé que $\tilde{p} \ll p_0$ et $s \ll 1$.

- On peut aussi écrire la dépendance en température comme suit :

$$c_{\text{gaz}} = \sqrt{\beta R_s T}$$

avec $R_s = 287 \text{ J/kg/K}$ et T la température en K.

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- Pour l'air, on utilisera une approximation pour $c(T) = c(\Theta)$ de la forme

$$c_{\text{air}}(T) = c_{\text{air}}(\Theta) = (331.3 + 0.606\Theta) \text{ m/s}$$

avec $\Theta = T - 273.16$ la température en C.

- Cette relation est valide pour des températures variant de -20 C à 40 C avec une erreur inférieure à 0.2%.
- À 20 C on obtient $c_{\text{air}} = 343.3$ m/s.
- Pour l'hélium à 0 C $c_{\text{hélium}} = 972$ m/s.

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Solution générale en 1 D.

$$\tilde{p}(x, t) = f\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi\nu t\right) + g\left(\frac{2\pi x}{\lambda} + 2\pi\nu t\right)$$

avec ν la fréquence et $\lambda = c/\nu$ la longueur d'onde de l'onde.

- Onde plane en 1-D

$$\tilde{p}(x, t) = A \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} \pm 2\pi\nu t\right)$$

- Onde sphérique en 3-D

$$\tilde{p}(r, t) = \frac{A}{r} \sin\left(\frac{2\pi r}{\lambda} \pm 2\pi\nu t\right)$$

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Énergie d'une onde sonore.

- L'intensité I d'une onde sonore est donnée par la relation $I = \nu \tilde{p}$ où ν est la vitesse des particules qui se déplacent dans l'onde (pas la vitesse de l'onde qui est notée c).
- Comme ces particules se déplacent sous l'action de la pression, la force exercée sur les particules est proportionnelle à l'accélération de celles-ci et

$$\rho \nu = - \int (\vec{\nabla} \cdot \vec{p}) dt \approx \frac{\tilde{p}}{c}$$

pour une onde sinusoïdale en 3-D. On obtient donc

$$I \approx \frac{\tilde{p}^2}{\rho c}$$

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Pour une source d'intensité I (W/m^2), la puissance P véhiculée par l'onde sonore est donnée par

$$P = \int I dS$$

Une source de puissance P émettant uniformément dans toutes les directions aura une intensité

$$I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Niveau de puissance sonore

- L'ouïe humaine peut détecter des différences de pression dans l'air variant de $20 \mu\text{Pa}$ à environ 100 Pa (seuil de la douleur).
- Ceci donne des valeurs de la puissance sonore P variant de plus de 14 ordres de grandeur.
- On utilise en général une échelle logarithmique pour qualifier le niveau de puissance sonore L_P en dB (décibel) :

$$L_P = 10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

avec $P_0 = 10^{-12} \text{ W}$.

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Le niveau d'intensité L_I sonore (dB) est relié au niveau de puissance sonore par :

$$L_I = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$
$$= L_P - 10 \log\left(\frac{S}{S_0}\right)$$

avec $S_0 = 1 \text{ m}^2$ et S la surface sur laquelle est distribuée la puissance P .

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Exemples de niveaux de puissance sonore.

Émetteur	P (W)	L_P (dB)
Fusée	1,000,000	180
Avion à réaction	10,000	160
Sirène	1,000	150
Concert rock	100	140
Hélicoptère	0.01	100
Cris	0.001	90
Frigo	10^{-7}	50
Seuil d'audition (à 28 cm)	10^{-12}	0

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Atténuation des ondes sonores

- La principale raison de l'atténuation du son est sa dispersion. Comme nous l'avons déjà vu, la pression d'une onde sonore sphérique diminue en $1/r$, son intensité variant comme $1/S$.
- L'atténuation des ondes sonores peut aussi être due à leur perte d'énergie due à la viscosité du milieu à mesure qu'elles se déplacent.
- Cette perte d'énergie est souvent faible puisqu'elle est reliée aux collisions entre les molécules du gaz dans le milieu. Elle dépend fortement de la fréquence de l'onde sonore.
- Si on connaît l'intensité d'une onde sonore à une distance r_0 de la source, son intensité à une distance r sera alors donnée par

$$L_I(r) = L_I(r_0) - 20 \log\left(\frac{r}{r_0}\right) - A(v)(r - r_0)$$

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- L'intensité du son diminue d'environ 6 dB chaque fois que l'on double la distance (atténuation due à la dispersion).
- Les coefficients d'atténuation par perte d'énergie due à la viscosité $A(\nu)$ pour des ondes sonores se déplaçant dans l'air à 20 °C et 70 % d'humidité relative sont quand à eux donnés par

Fréquence ν	$A(\nu)$
125 Hz	0.3 dB/km
250 Hz	1.1 dB/km
500 Hz	2.8 dB/km
1000 Hz	5.0 dB/km
2000 Hz	9.0 dB/km
8000 Hz	76.6 dB/km

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

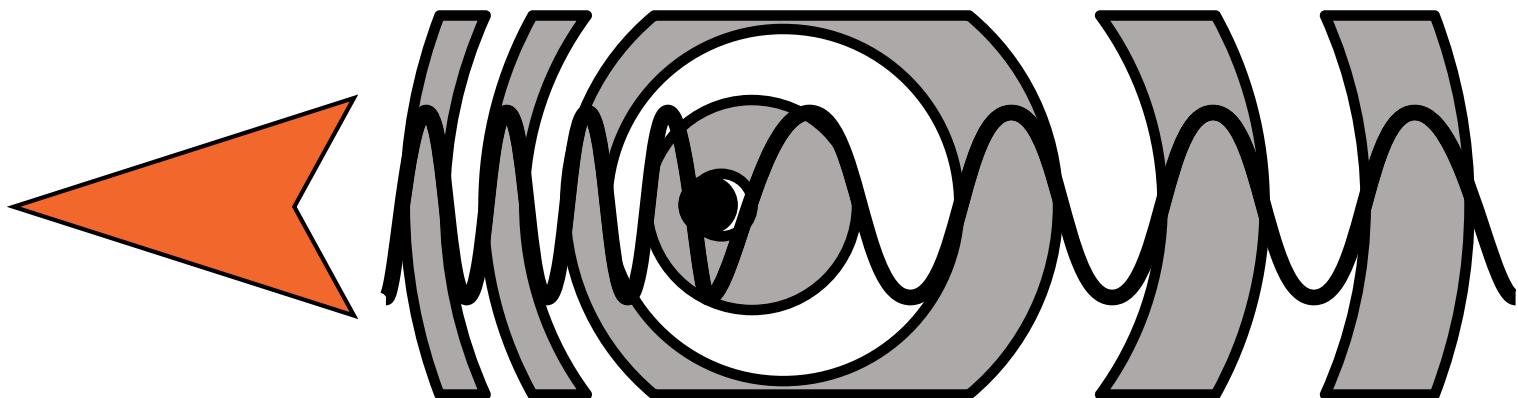
Audition

Conclusions

L'effet Doppler c'est

- le décalage de fréquence d'une onde entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps.

Cet effet fut décrit la première fois par Christian Doppler en 1842 et confirmé sur les sons en utilisant des musiciens jouant une note calibrée sur un train de la ligne Utrecht-Amsterdam.



Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- L'effet Doppler se manifeste par exemple pour les ondes sonores dans la perception de la hauteur du son d'un moteur de voiture, ou de la sirène d'un véhicule d'urgence.
- Le son est différent selon que l'on est dans le véhicule (l'émetteur est immobile par rapport au récepteur), que le véhicule se rapproche du récepteur (le son devient plus aigu) ou qu'il s'éloigne (le son devient plus grave).
- Cet effet est utilisé pour mesurer une vitesse, par exemple celle d'une voiture, ou bien celle du sang lorsqu'on réalise des examens médicaux (notamment les échographies en obstétrique ou en cardiologie).

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- Il s'applique aussi à la lumière et est donc d'une grande importance en astronomie, car il permet de déterminer directement la vitesse d'approche ou d'éloignement des objets célestes (étoiles, galaxies, nuages de gaz, etc.).
- Il s'applique aussi aux ondes de surface (vagues) même si on en tient peu compte, les vitesses mises en jeu étant trop faibles.

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

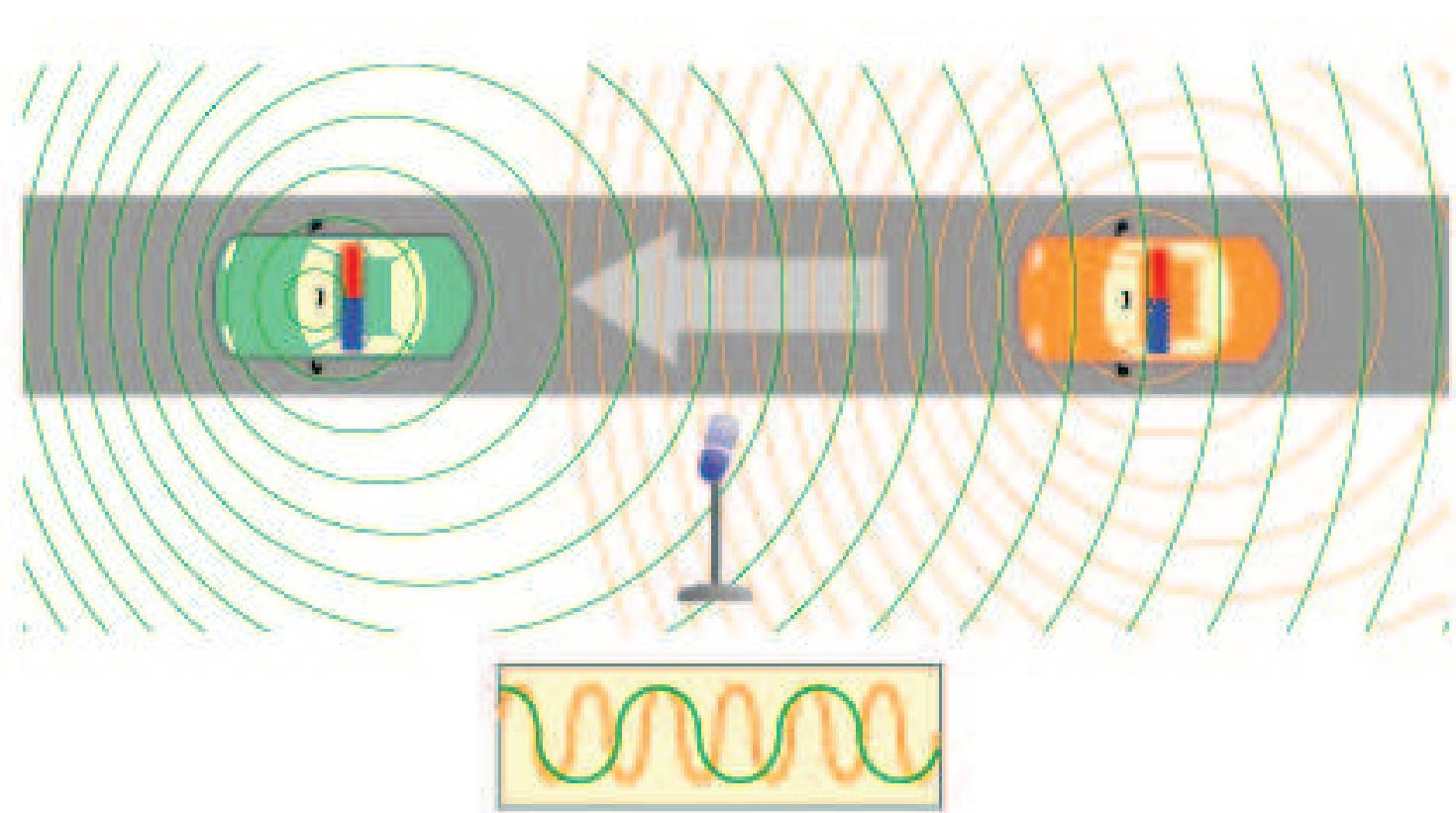
Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Son perçu par une automobiliste en mouvement par rapport à une source fixe.



Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Description de l'effet Doppler :

- une personne est debout dans l'eau, au bord du rivage ;
- des vagues lui arrivent sur les pieds toutes les dix secondes ;
- la personne commence à marcher et va à la rencontre des vagues ;
- les vagues l'atteignent avec une fréquence plus élevée (par exemple toutes les huit secondes) ;
- la personne fait alors demi-tour et marche en direction de la plage ;
- les vagues l'atteignent avec une fréquence moins élevée (par exemple toutes les douze secondes) ;

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- on peut aussi considérer une source mobile de vagues ;
- si la source se déplace dans la direction d'un observateur au repos, il observera des vagues plus resserrées ;
- si la source se déplace dans la direction opposée à l'observateur alors il observera des vagues plus espacées.

La fréquence des vagues détectée par une personne en mouvement dépend de sa vitesse par rapport à l'eau, la fréquence des vagues elle même dépend de la vitesse de la source (émetteur de vagues) par rapport à l'eau.

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Pour dériver l'effet Doppler, il faut donc considérer trois référentiels :

1. le milieu au repos dans lequel se propage l'onde de vitesse c (par exemple l'air pour une onde sonore) ;
2. le référentiel de l'émetteur (source) ayant une vitesse \vec{v}_s par rapport au milieu au repos, cette source étant situé au point $\vec{r}_s(t)$;
3. le référentiel au récepteur ayant une vitesse \vec{v}_r par rapport au milieu au repos, le récepteur étant situé au point $\vec{r}_r(t)$.

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

On supposera aussi que l'onde se déplace en ligne droite de la source au récepteur dans le milieu au repos, sa direction étant

$$\vec{u}_{s,r} = \frac{\vec{r}_r(t) - \vec{r}_s(t)}{|\vec{r}_r(t) - \vec{r}_s(t)|}$$

Les vitesses du récepteur et de la source sont positives si dans la direction de propagation du signal ($\vec{u}_{s,r}$) et négatives dans une direction opposée.

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Si ν_s est la fréquence de l'onde dans le référentiel de la source, alors le récepteur va recevoir une onde de fréquence ν_r donnée par

$$\nu_r = \frac{c - (\vec{\nu}_r \cdot \vec{u}_{s,r})}{c - (\vec{\nu}_s \cdot \vec{u}_{s,r})} \nu_s = \frac{1 - \beta_r}{1 - \beta_s} \nu_s$$

avec

$$\beta_r = \frac{(\vec{\nu}_r \cdot \vec{u}_{s,r})}{c} = \frac{|\vec{\nu}_r| \cos(\theta)}{c}$$

$$\beta_s = \frac{(\vec{\nu}_s \cdot \vec{u}_{s,r})}{c} = \frac{|\vec{\nu}_s| \cos(\theta')}{c}$$

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

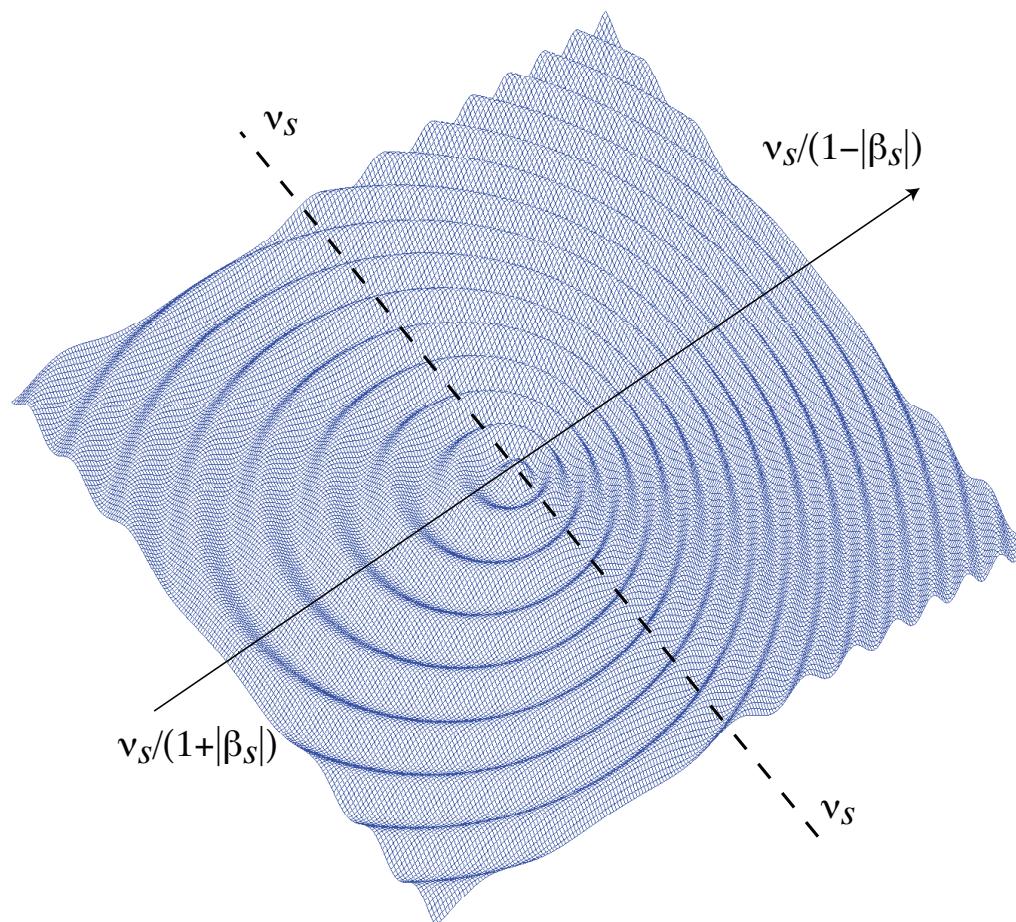
Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Effet Doppler dû au mouvement de la source.



Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Preuve pour émetteur produise des bips à une fréquence ν_s

- Lorsque le deuxième bip est produit, le premier bip a parcouru une distance

$$d_{e,0} = \frac{c}{\nu_s}$$

- La source s'est aussi déplacée de $c\beta_s/\nu_s$.
- La distance séparant deux bips est alors

$$d_{e,1} = \frac{c(1 - \beta_s)}{\nu_s}$$

- La fréquence de l'onde dans le milieu est alors

$$\nu_m = \frac{c}{d_{e,1}} = \frac{\nu_s}{(1 - \beta_s)}$$

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- Si récepteur reçoit le premier bip après un temps t_1 et le deuxième bip après un temps t_2 , il aura lui-même parcouru la distance

$$d_{r,1} = c\beta_r(t_2 - t_1) = \frac{c\beta_r}{v_r}$$

où $v_r = 1/(t_2 - t_1)$ est la fréquence perçue par le récepteur.

- Le déplacement total du second bip par rapport au premier pour le récepteur est

$$d_{r,2} = d_{e,1} + d_{r,1} = \frac{c}{v_r}$$

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

On écrira alors

$$\frac{c(1 - \beta_s)}{\nu_s} + \frac{c\beta_r}{\nu_r} = \frac{c}{\nu_r}$$

d'où

$$\nu_r = \frac{c - (\vec{\nu}_r \cdot \vec{u}_{s,r})}{c - (\vec{\nu}_s \cdot \vec{u}_{s,r})} \nu_s = \frac{1 - \beta_r}{1 - \beta_s} \nu_s$$

La fréquence perçue par le récepteur par rapport à la fréquence dans le milieu est alors

$$\nu_m = \frac{c}{d_{e,1}} = (1 - \beta_r) \nu_m$$

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- si l'émetteur est immobile et le récepteur en mouvement on obtient

$$\nu_r = (1 - \beta_r) \nu_s$$

- si l'émetteur est en mouvement et le récepteur immobile on obtient

$$\nu_r = \frac{1}{1 - \beta_s} \nu_s \approx (1 + \beta_s) \nu_s$$

la dernière approximation étant valide seulement lorsque $\beta_s \ll 1$.

Noter que lorsque l'émetteur se rapproche du récepteur $\beta_s > 0$.
Lorsque le récepteur se rapproche de l'émetteur $\beta_r < 0$.

Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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.

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

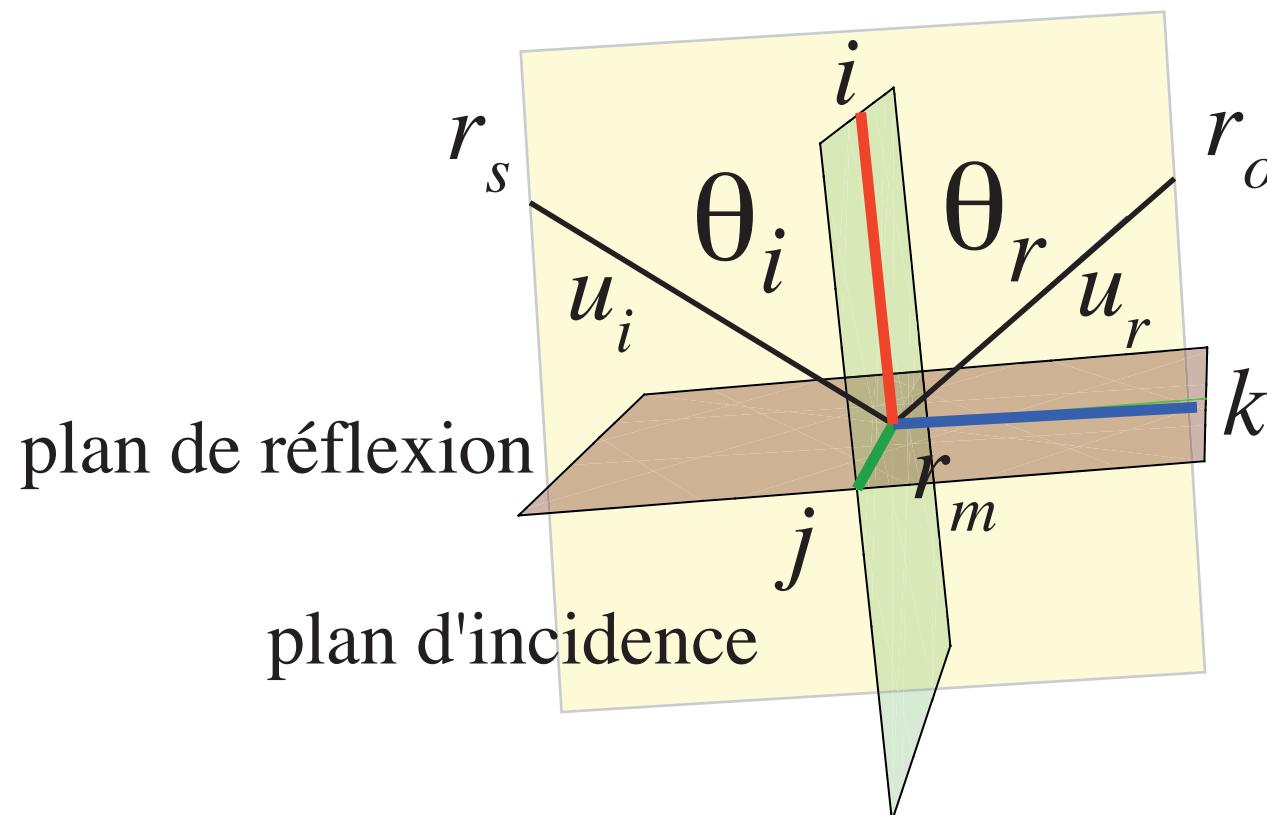
Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Notation en 3-D pour la réflexion.



Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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 vecteur \vec{j} représente la normale au plan d'incidence.
- Le plan de réflexion peut être défini en utilisant les vecteurs unitaires \vec{j} et \vec{k} avec

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

- Le plan d'incidence est défini par le vecteurs \vec{i} et \vec{k} .

Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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.

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

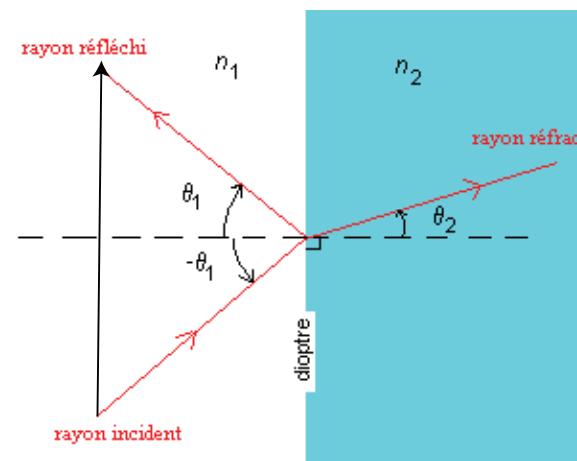
Son

Audition

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.

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

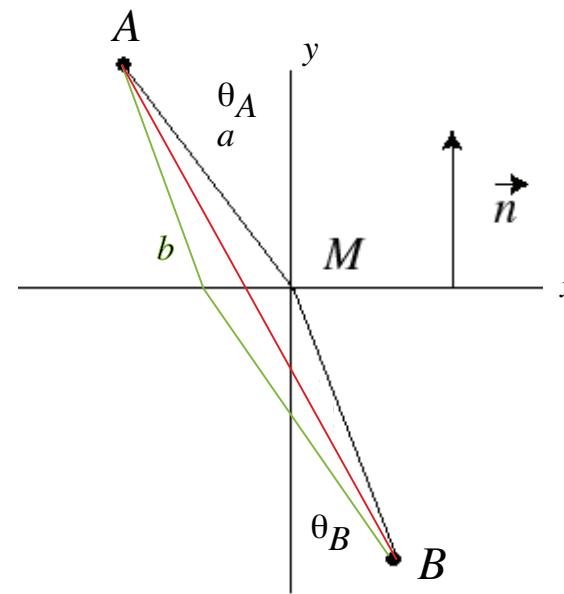
Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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 est 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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

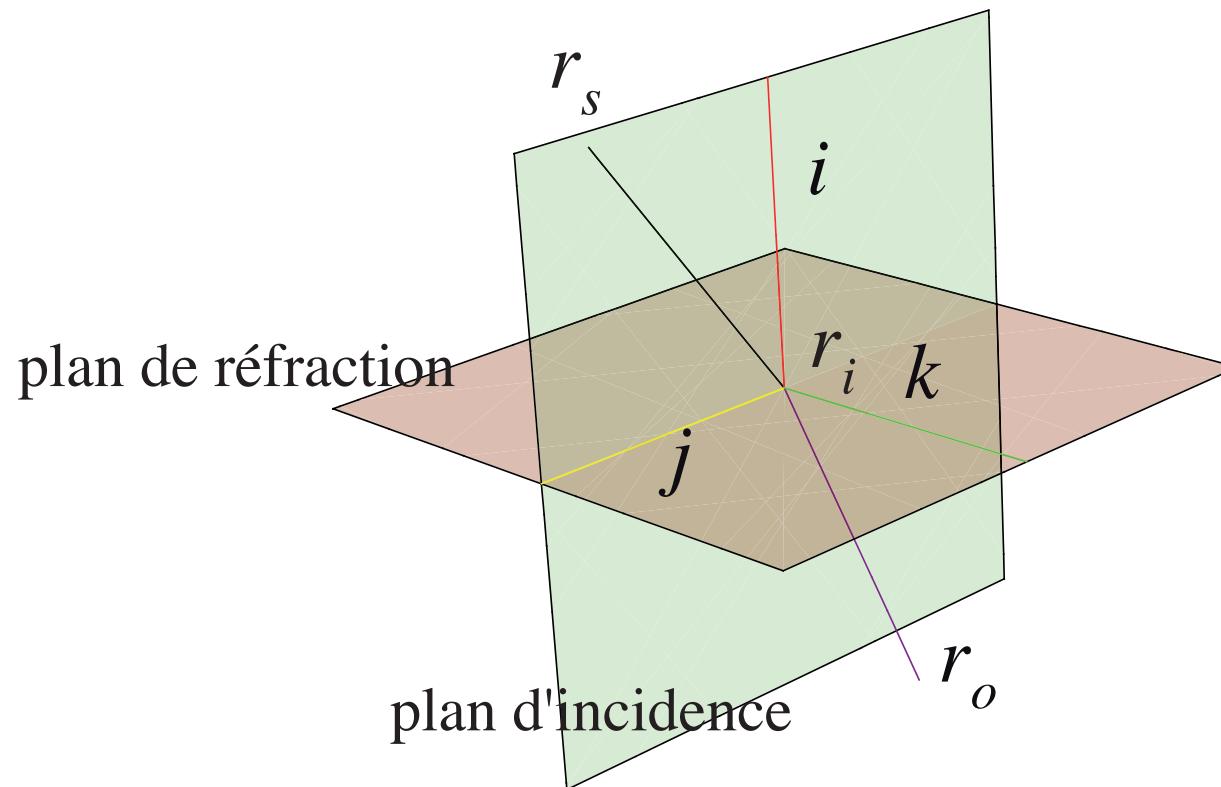
Acoustique physique

Son

Audition

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).



Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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 de réfraction.
- $\vec{k} = \vec{i} \times \vec{j}$ sert (avec \vec{i}) à définir le plan d'incidence.

Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

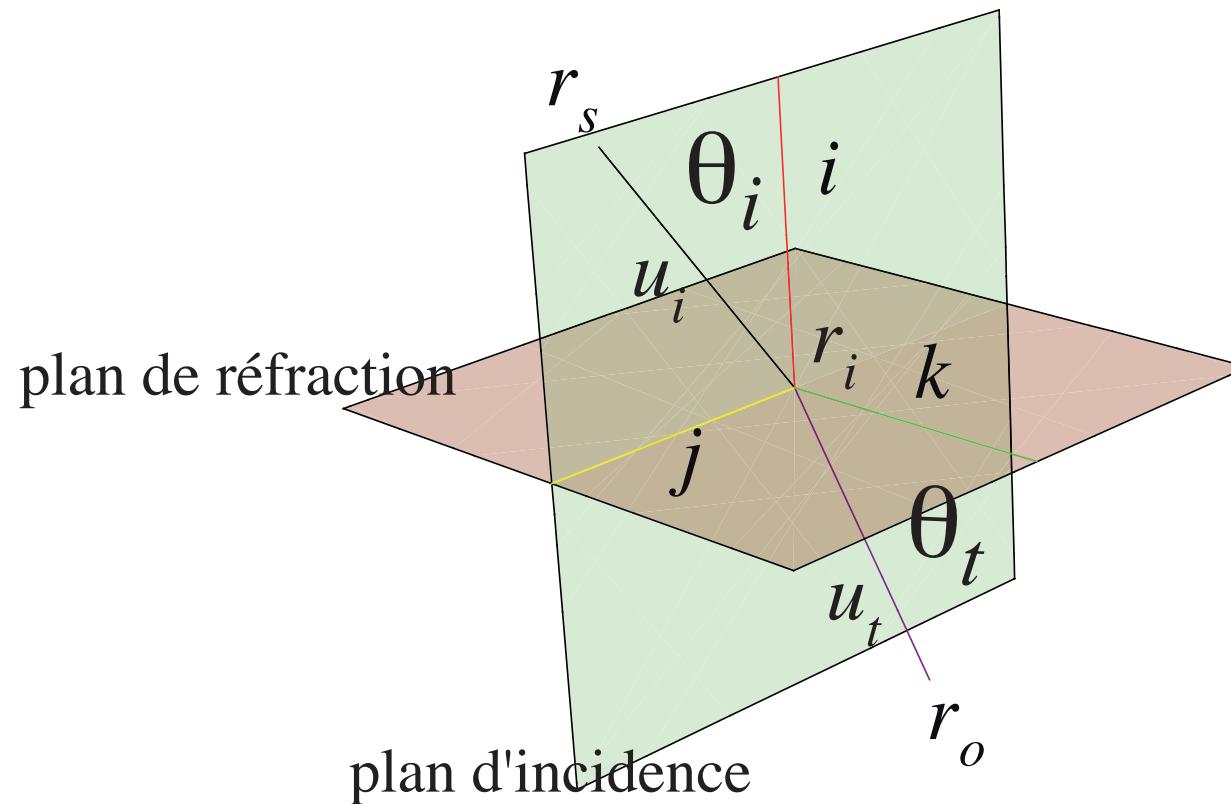
Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Notation en 3-D pour la réfraction.



Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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.

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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).

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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 .

Acoustique physique

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Acoustique physique

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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.

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

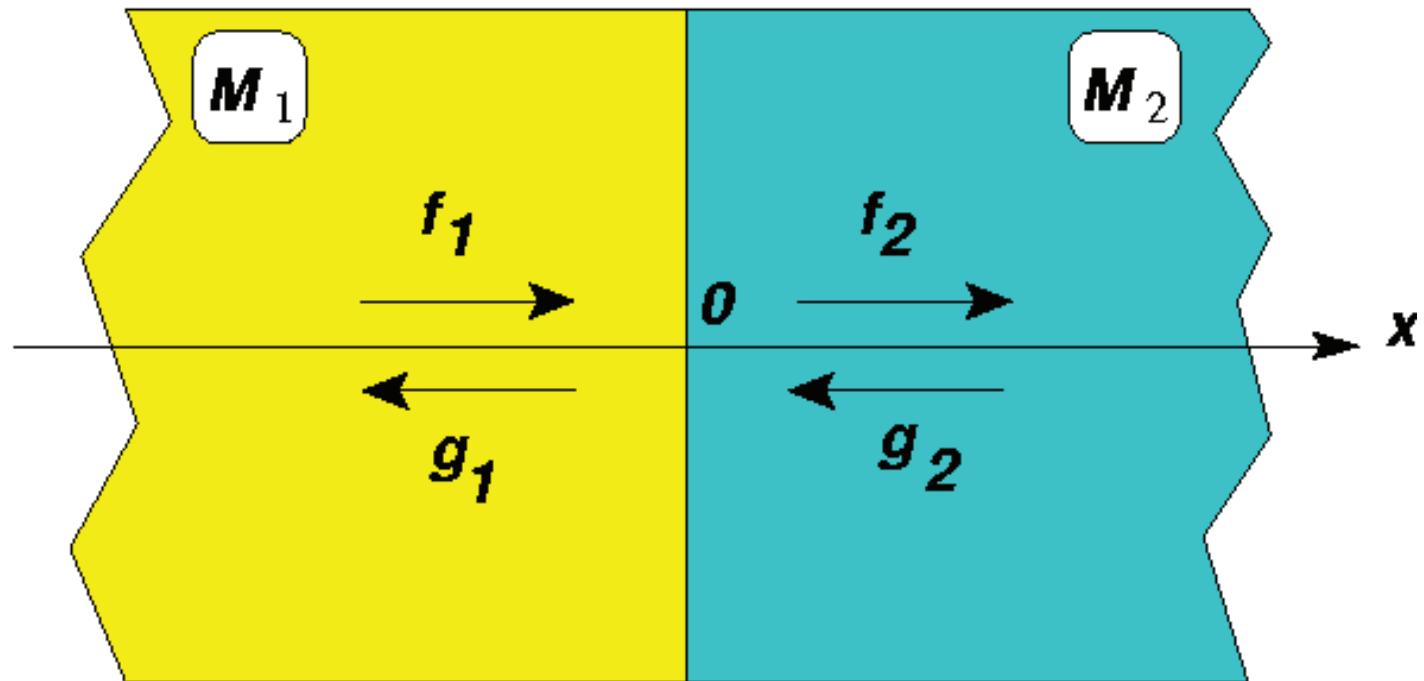
Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Interface acoustique



Acoustique physique

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Finalement, on utilisera

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

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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.

Acoustique physique

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- Notez que la conservation d'énergie implique

$$R + T = 1$$

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

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

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

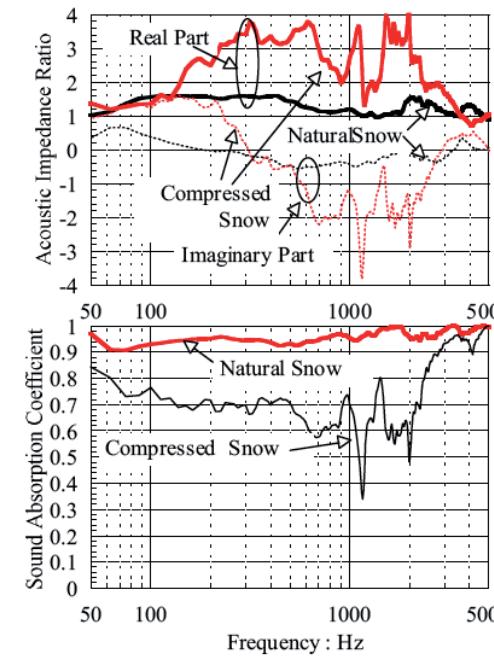
Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Neige



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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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.

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

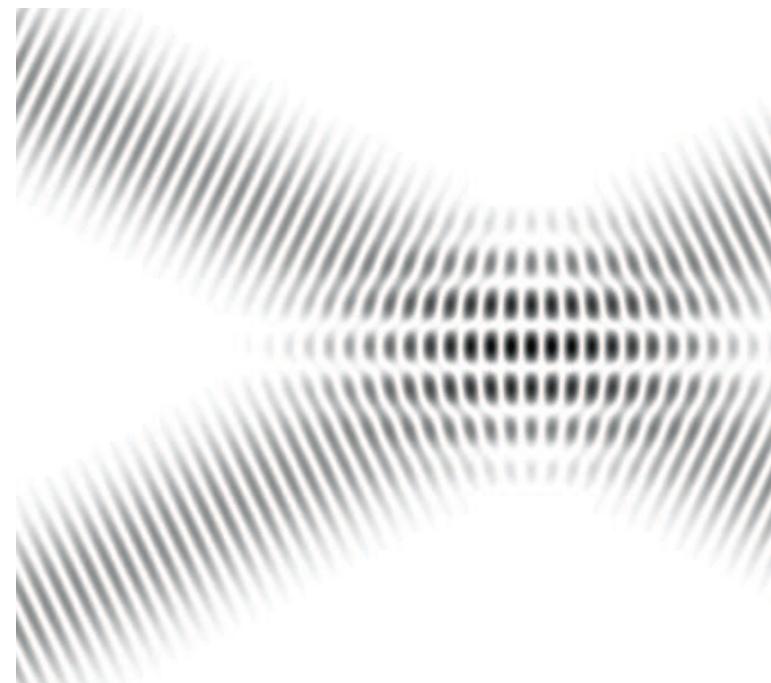
Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Interférence d'ondes planes



Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

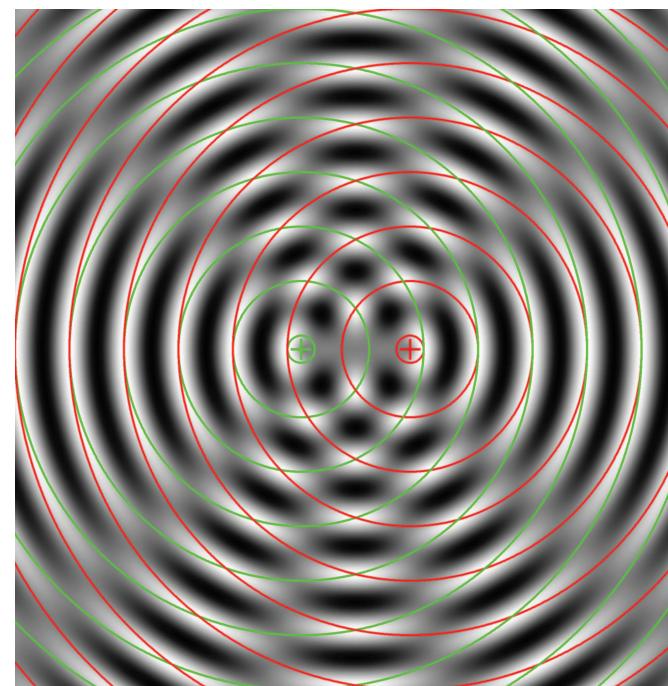
Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Interférence d'ondes radiales



Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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).

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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.

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

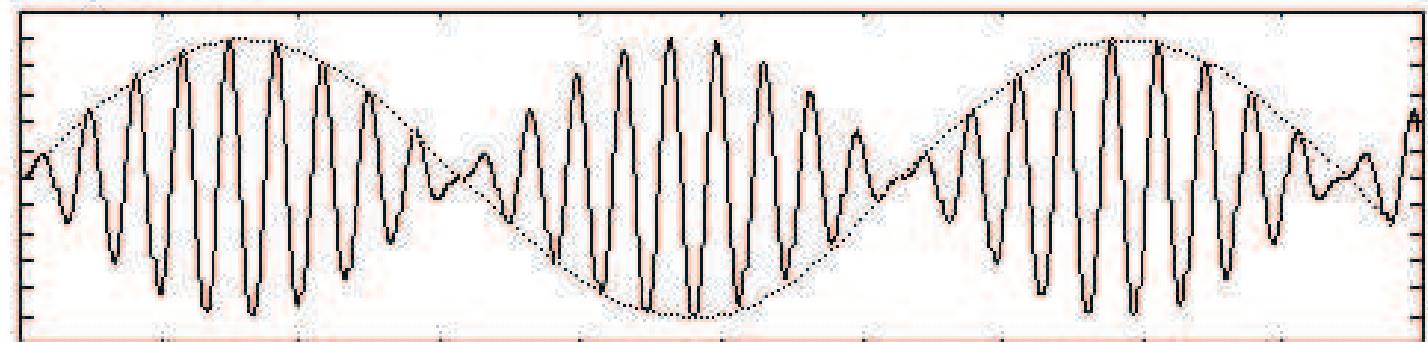
Audition

Conclusions

Battements

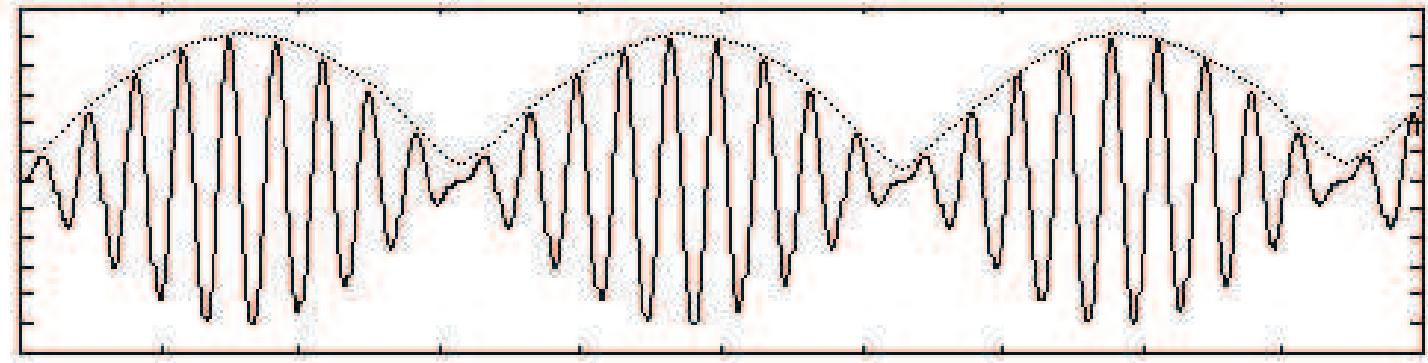
mathématiquement

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



perceptivement

$$|f_1 - f_2|$$



Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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.

Acoustique physique

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

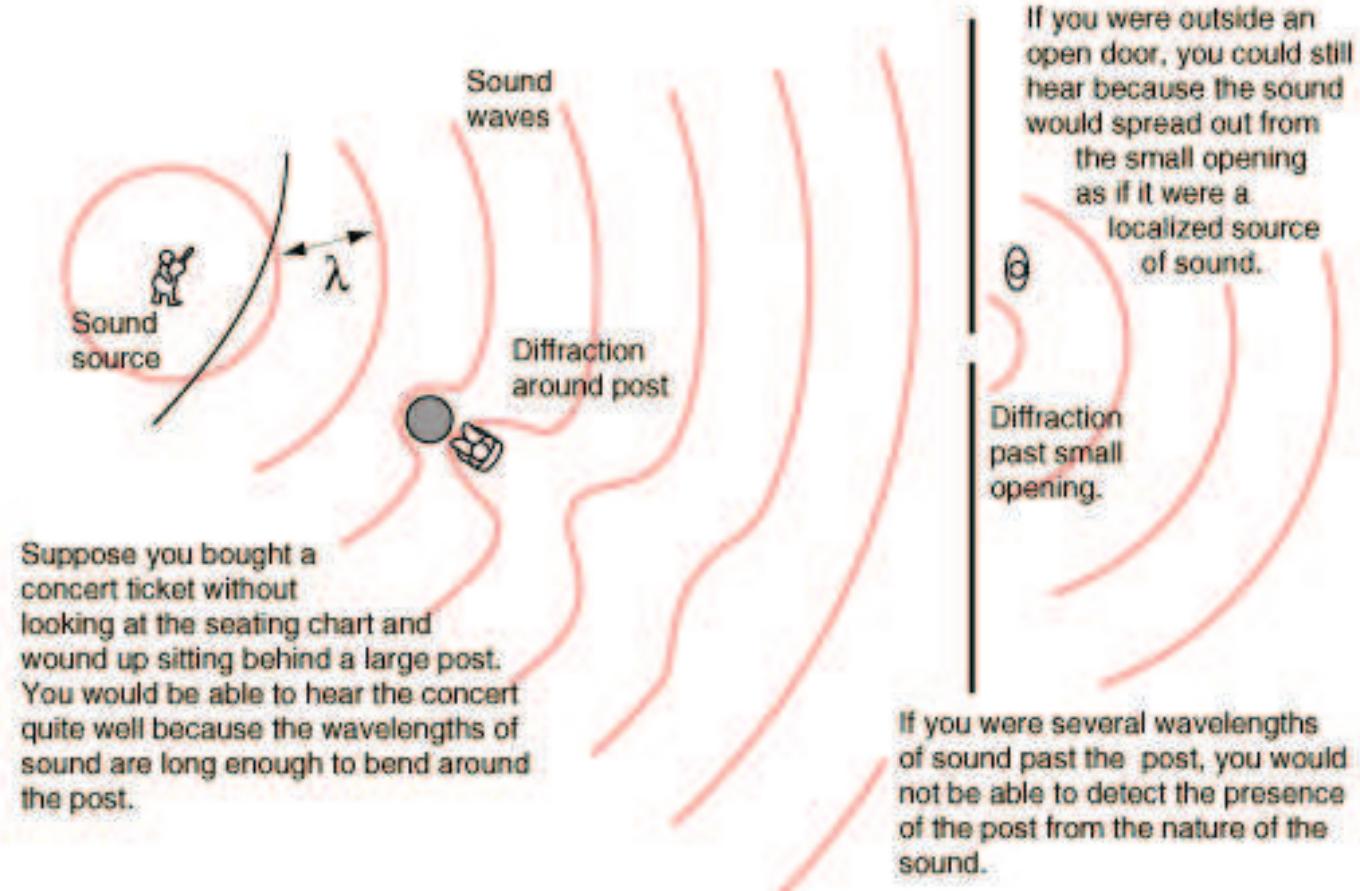
Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Diffraction des ondes sonores



Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

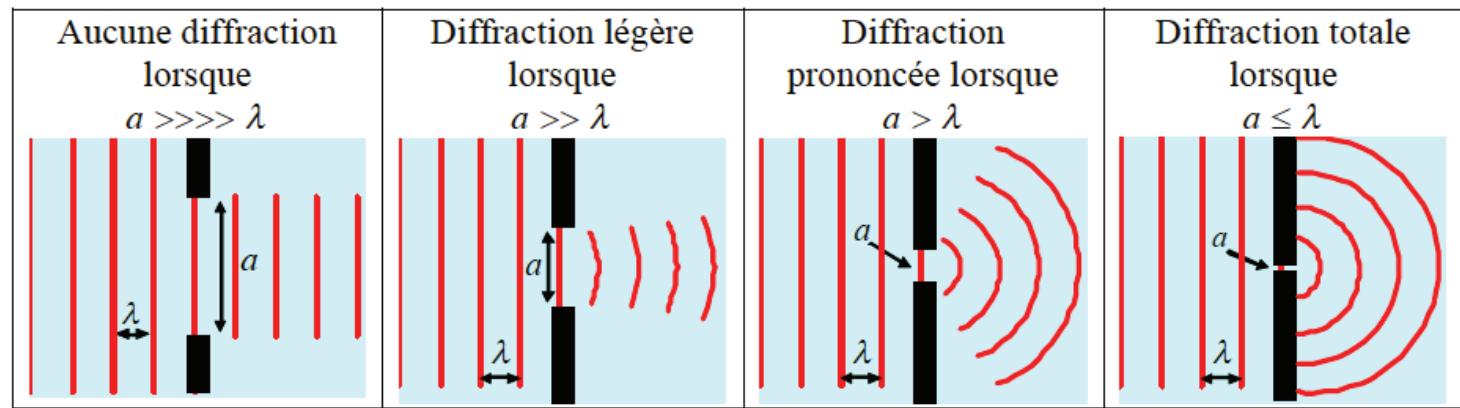
Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Conditions de diffraction



Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

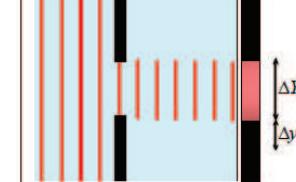
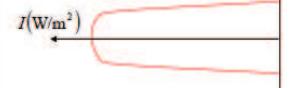
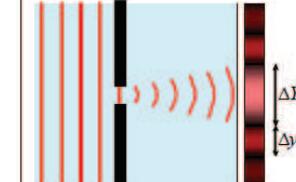
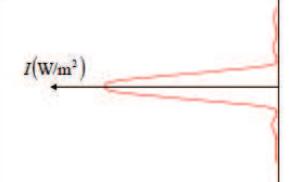
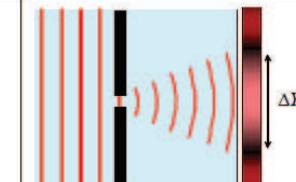
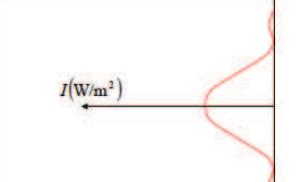
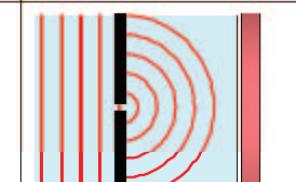
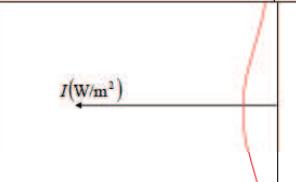
Acoustique physique

Son

Audition

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 $a >>> \lambda$		
Diffraction légère $a >> \lambda$		
Diffraction prononcée $a > \lambda$		
Diffraction complète $a \leq \lambda$		

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

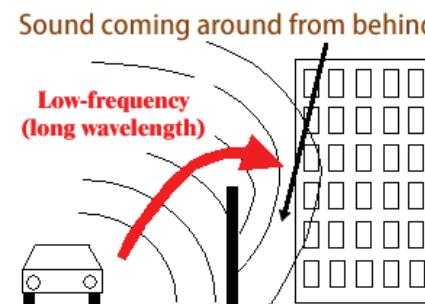
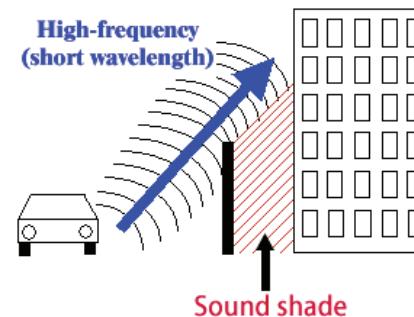
Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Barrière sonore



Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

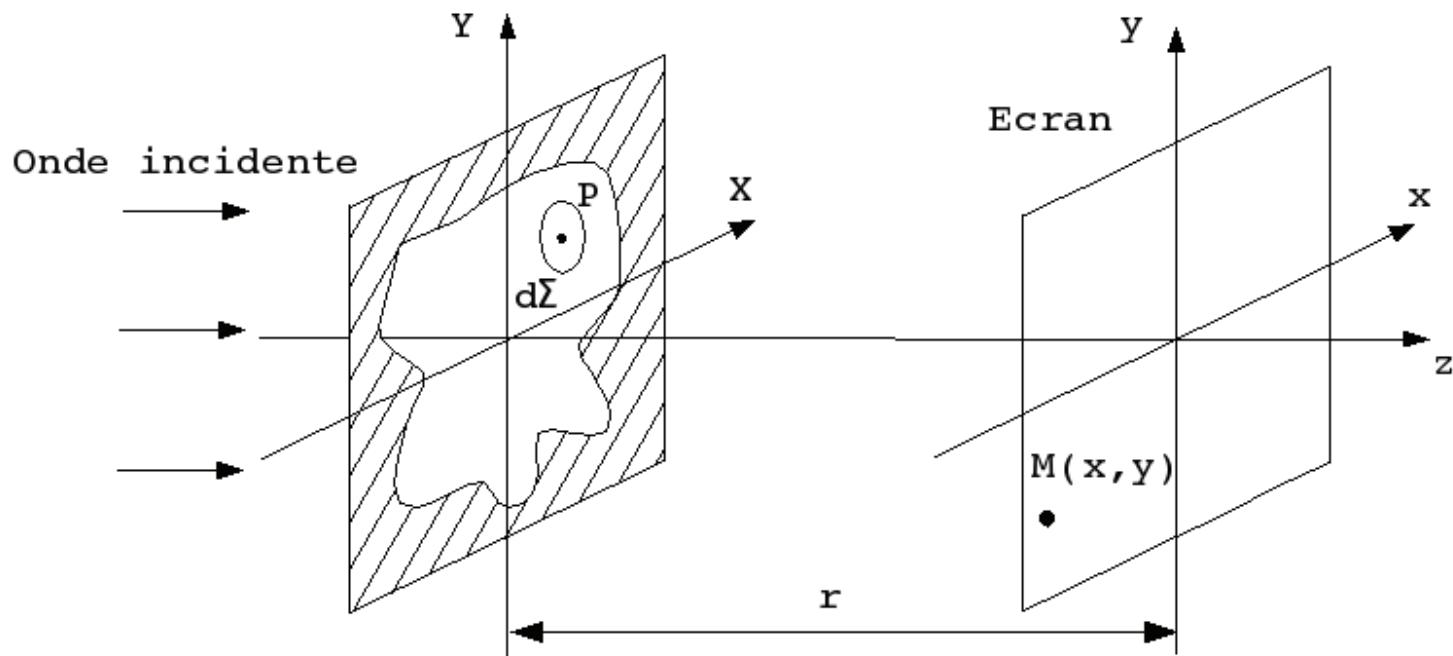
Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Analyse de la diffraction



Acoustique physique

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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

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

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.

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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.

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

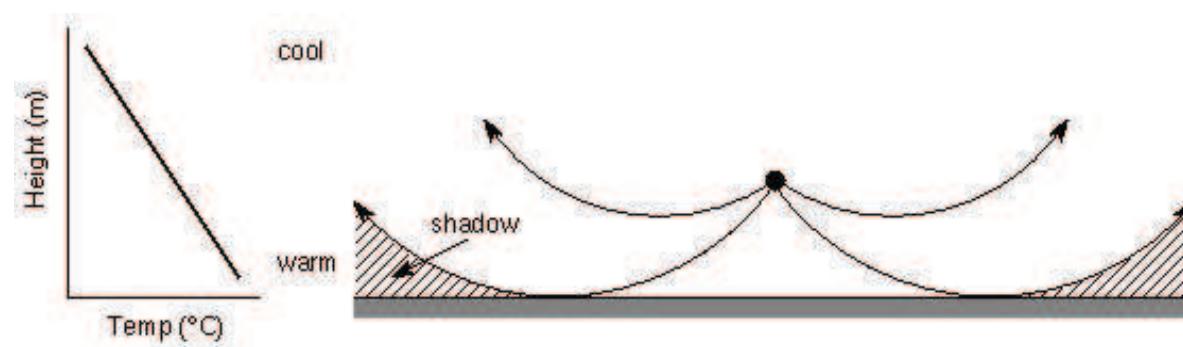
Conclusions

- 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.

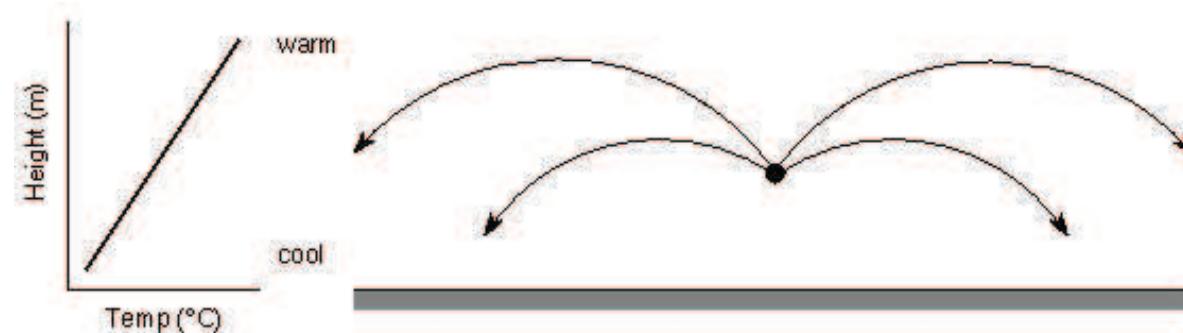
- Ondes sonores
- Effet Doppler
- Réflexion et réfraction
- Acoustique physique
- Son**
- Audition
- Conclusions

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

Cas standard.



Inversion de température.



Audition

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

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.
- Par extension, le son désigne aussi la perception auditive de cette onde.
- Deux seuils sont 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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- 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.

Conclusions

Ondes sonores
Effet Doppler
Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Conclusions

Dans le prochain chapitre, nous étudierons l'optique :

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