



**PHS 4700**  
**Physique pour les applications multimédia**

# Chapitre 8 — Acoustique

Djamel Seddaoui  
Département de Génie Physique

# Table des matières

---

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

Ondes sonores  
Effet Doppler  
Réflexion et réfraction  
Acoustique physique

# Ondes sonores

## 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

## 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

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

### ■ 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

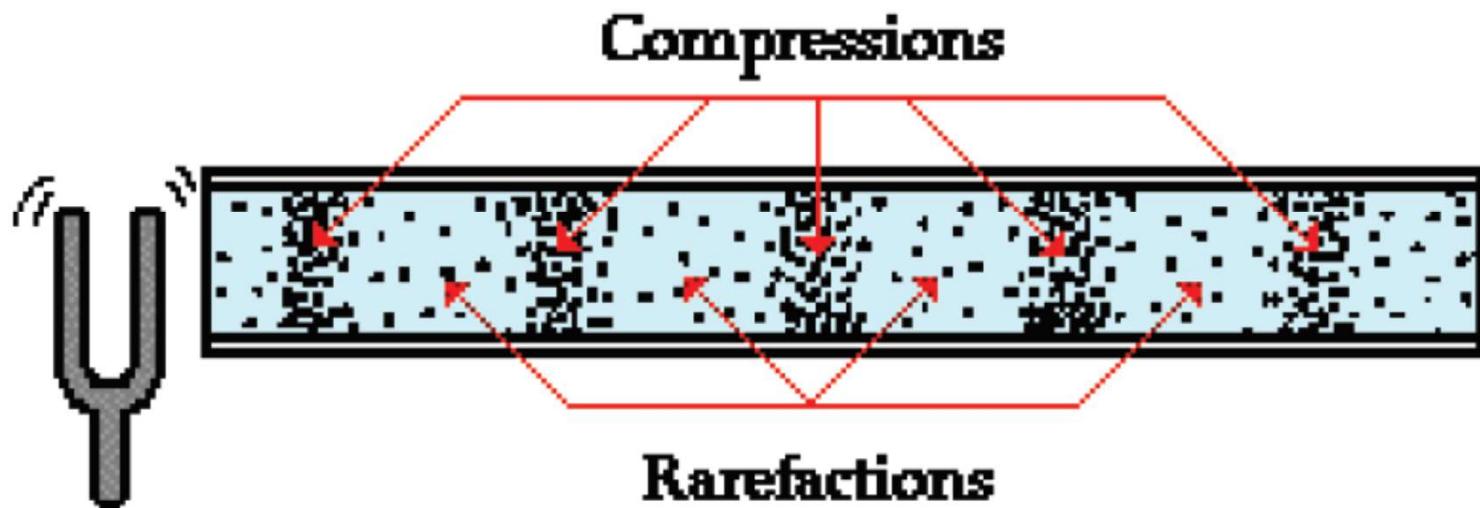
Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

## Ondes de pression.



# Ondes sonores

## 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  $\gamma$  est fonction de la température.

- Pour un processus adiabatique (sans échange de chaleur) on supposera que  $\gamma$  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  $\rho$  du gaz varieront autour de valeurs d'équilibre  $p_0$  et  $\rho_0$  lors du passage de l'onde.

- On définit  $s$  la variation relative de la masse volumique par rapport à  $\rho_0$

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

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

- Une expansion de  $p$  au premier ordre en  $\rho$  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  $v$  des équations de conservation on obtient plutôt

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

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

## 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  $\nu$  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  $\nu$  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

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

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  $I$  ( $\text{W/m}^2$ ), 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

## 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  $100 \text{ Pa}$  (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

## 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 $\nu$	$A(\nu)$
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

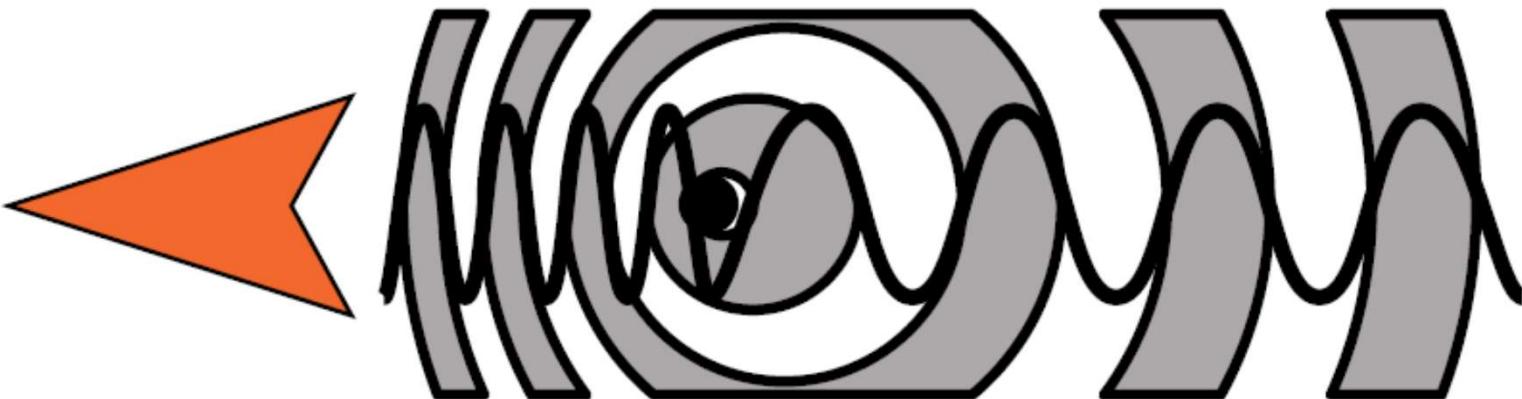
Audition

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

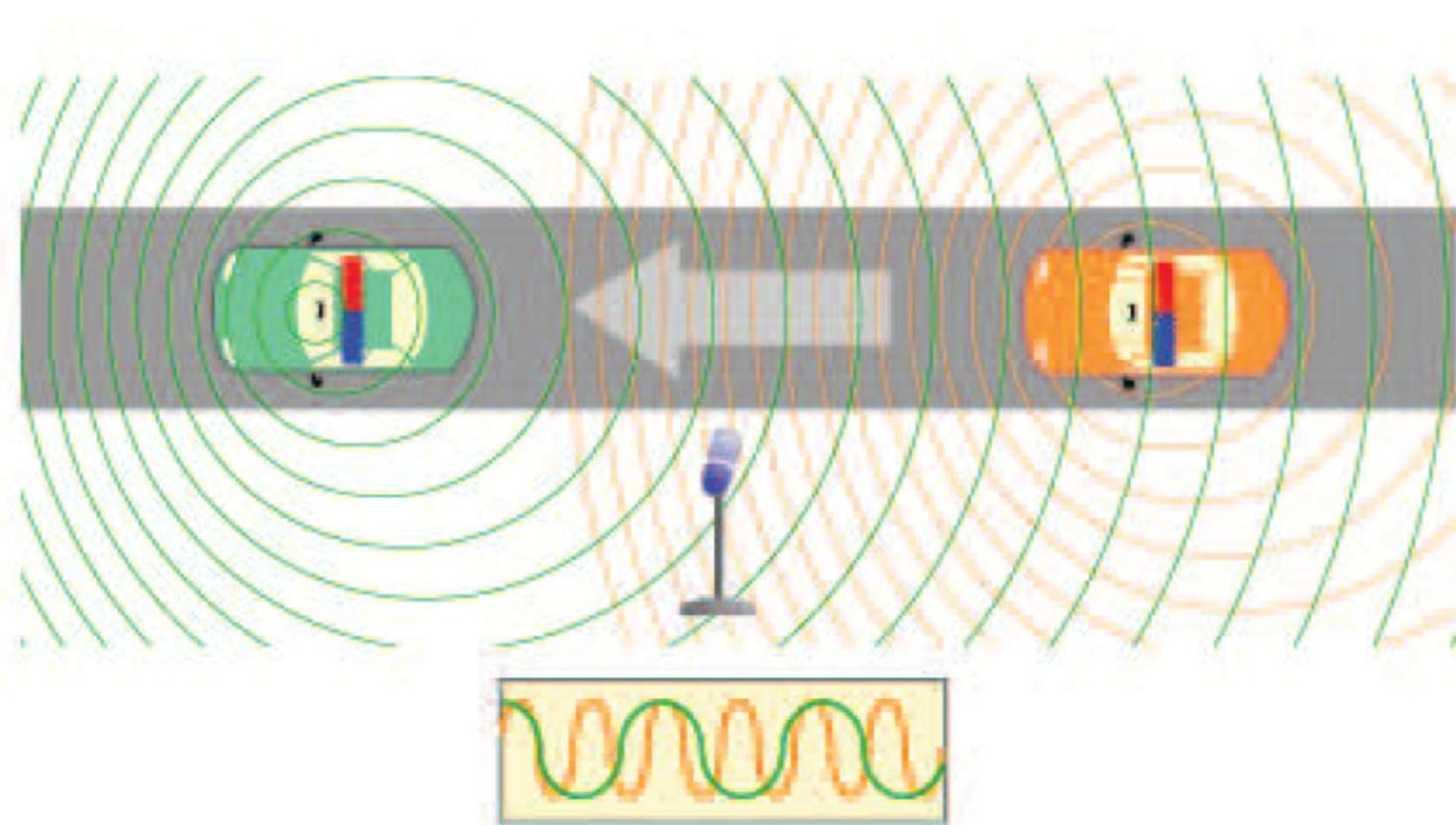
Acoustique physique

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  $\nu_s$  est la fréquence de l'onde dans le référentiel de la source, alors le récepteur va recevoir une onde de fréquence  $\nu_r$  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

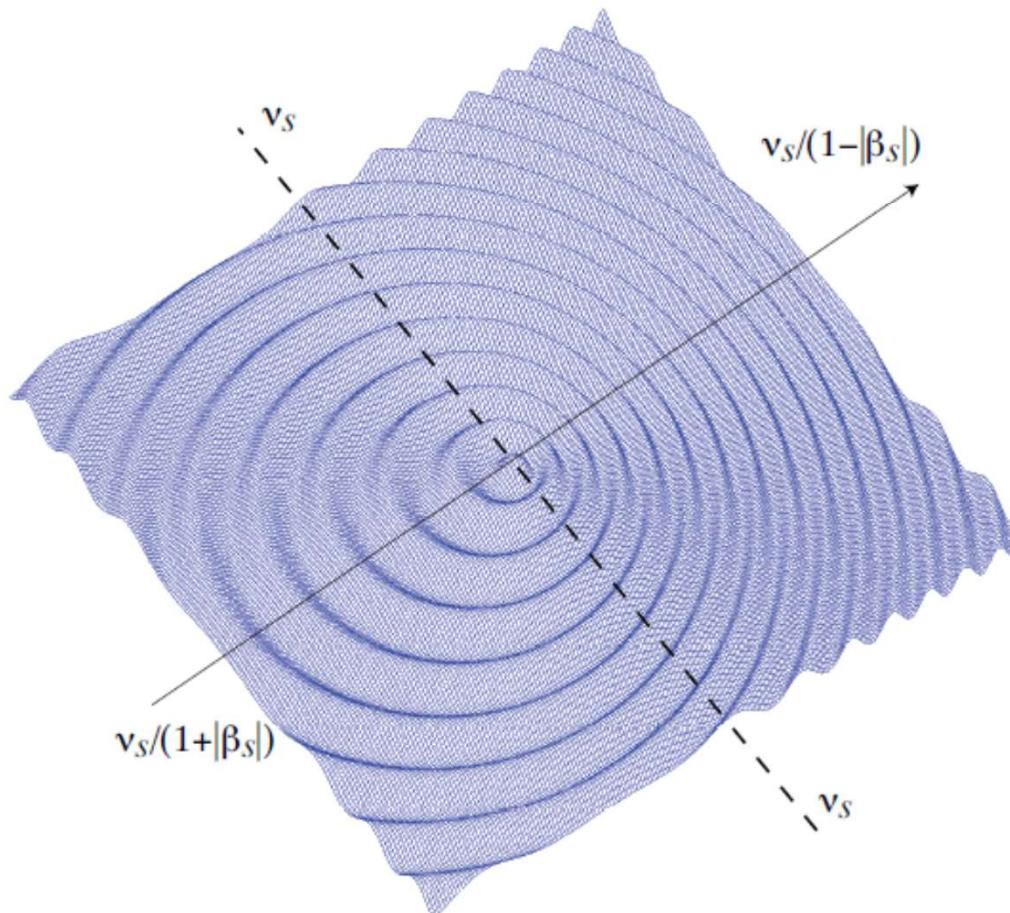
Acoustique physique

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  $\nu_s$

- 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

$$\frac{c(1 - \beta_s)}{v_s} + \frac{c\beta_r}{v_r} = \frac{c}{v_r}$$

d'où

$$v_r = \frac{c - (\vec{v}_r \cdot \vec{u}_{s,r})}{c - (\vec{v}_s \cdot \vec{u}_{s,r})} v_s = \frac{1 - \beta_r}{1 - \beta_s} v_s$$

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

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

# 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

$$v_r = (1 - \beta_r)v_s$$

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

$$v_r = \frac{1}{1 - \beta_s} v_s \approx (1 + \beta_s) v_s$$

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

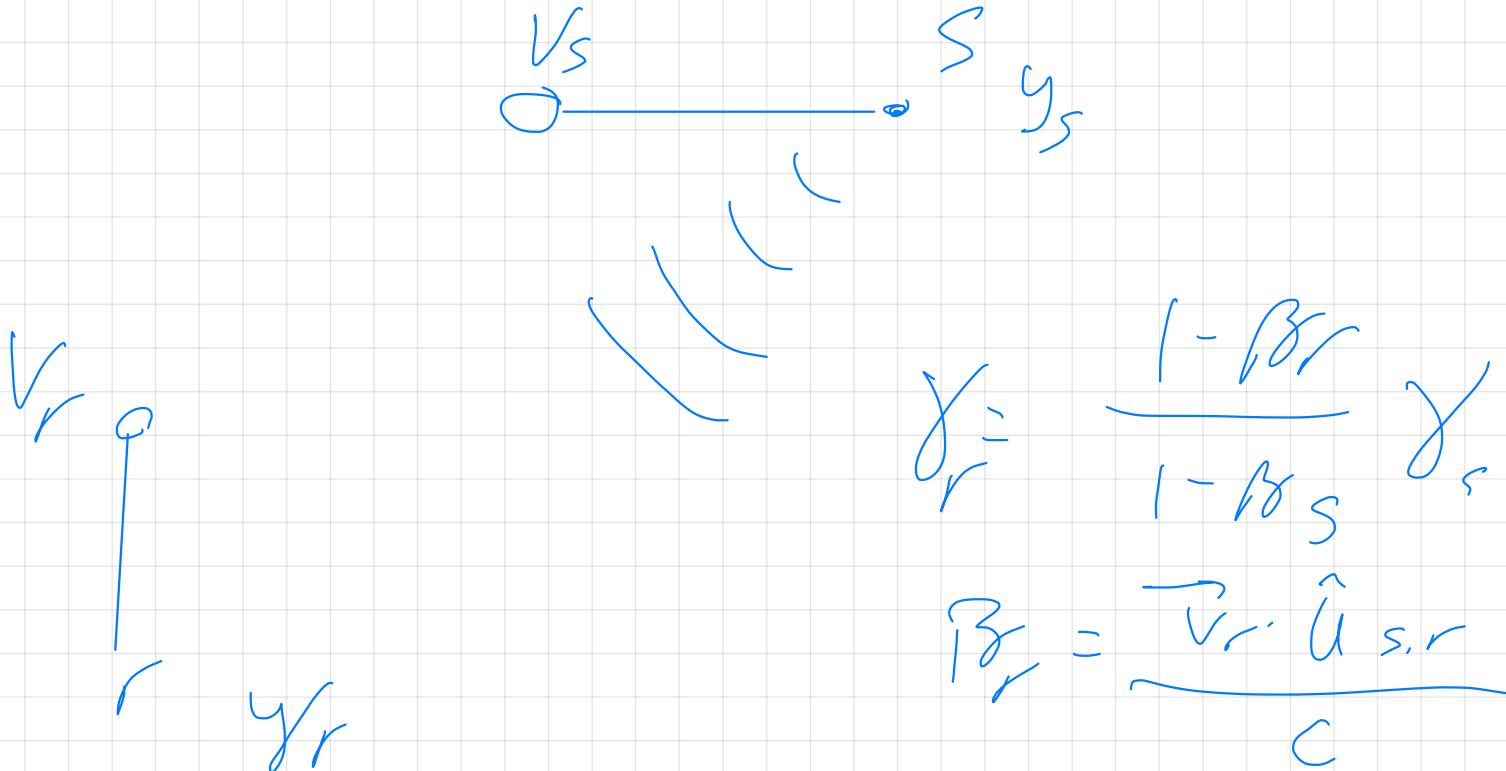
Audition

Musique

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 solide ;
- une transmission partielle combinée à une réflexion partielle entre deux milieux.

Ce sont ces modèles que nous étudierons maintenant et qui se révèleront très utiles pour étudier le son transmis d'un milieu à un autre.



$$\gamma_r = \frac{1 - \beta_r}{1 - \beta_s} \gamma_s$$

$$\beta_r = \frac{\vec{V}_r \cdot \hat{U}_{sr}}{C}$$

$$\beta_s = \frac{\vec{V}_s \cdot \hat{U}_{sr}}{C}$$

# Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

**Réflexion et réfraction**

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

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 ou transparente.

# Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

**Réflexion et réfraction**

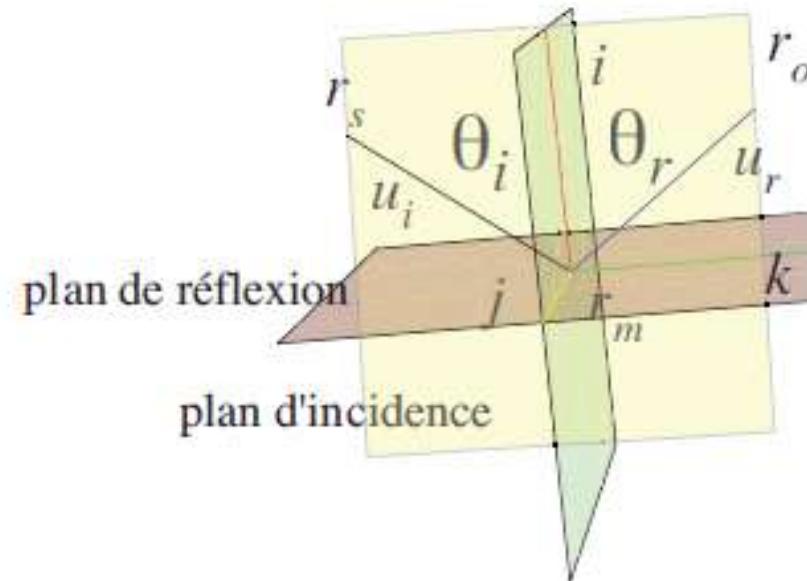
Acoustique physique

Son

Audition

Musique

## Réflexion



Ondes sonores

Effet Doppler

**Réflexion et réfraction**

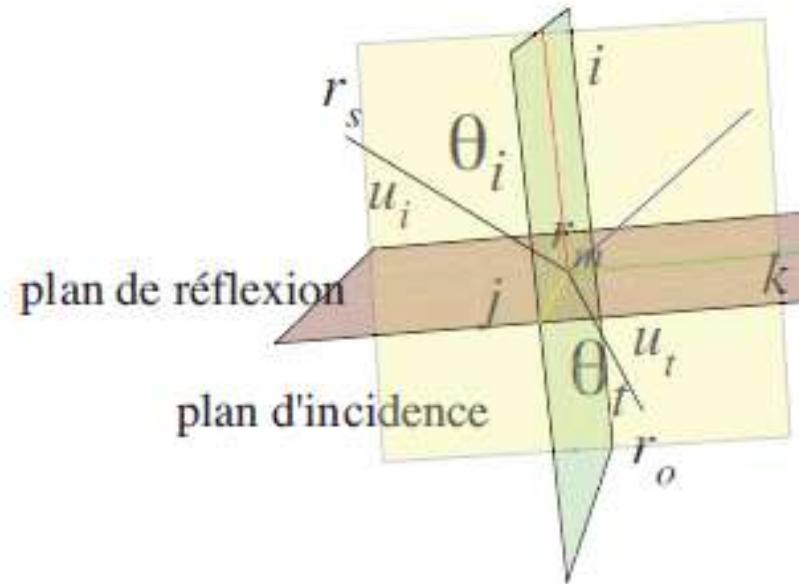
Acoustique physique

Son

Audition

Musique

## Réfraction



# Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

**Réflexion et réfraction**

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

En utilisant la normale unitaire  $\hat{i}$  (sortante) à la surface de réflexion au point  $\vec{r}_m$  et

$$\begin{aligned}\hat{j} &= \frac{\hat{u}_i \times \hat{i}}{|\hat{u}_i \times \hat{i}|}, \\ \hat{k} &= \hat{i} \times \hat{j}.\end{aligned}$$

Le plan défini par  $\hat{i}$  et  $\hat{k}$  est le plan d'incidence (normale  $\hat{j}$ ) et le plan de réflexion/transmission est défini par les vecteurs  $\hat{j}$  et  $\hat{k}$ .

# Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

**Réflexion et réfraction**

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

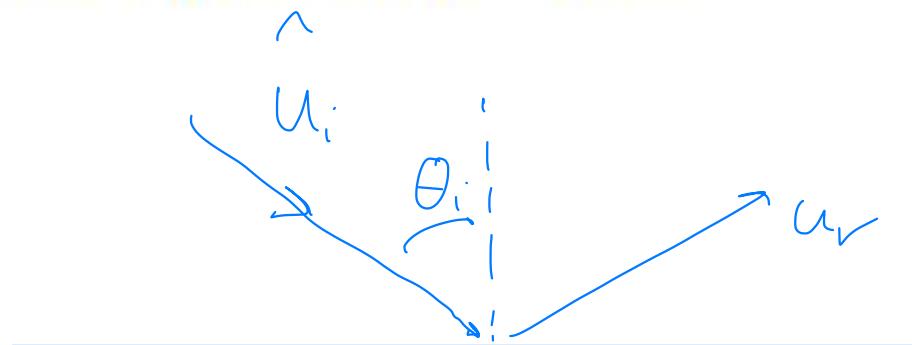
Le rayon de lumière sera réfléchi dans le plan d'incidence de façon symétrique par rapport à la normale au plan de réflexion

$$\hat{u}_r = \hat{u}_i - 2\hat{i}(\hat{u}_i \cdot \hat{i}) = \cos\theta_i \hat{i} + \sin\theta_i \hat{k}.$$

avec

$$\sin\theta_r = \sin\theta_i .$$

C'est la première loi de Snell-Descartes.



$$\hat{u}_r = \hat{u}_i - 2\hat{i}(\hat{u}_i \cdot \hat{i})\hat{i}$$

## Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Le rayon de lumière transmis sera dans le plan d'incidence et sa direction sera

$$\hat{u}_t = -\hat{i} \cos \theta_t + \hat{k} \sin \theta_t.$$

avec

$$\sin \theta_t = \left( \frac{c_t}{c_i} \right) \sin \theta_i.$$

C'est la seconde loi de Snell-Descartes. Ici, on a utilisé directement les vitesses au lieu des indices de réfraction, car pour le son, il n'y a pas de vitesse qui peut facilement être choisie pour servir de référence absolue.

# Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

- Si  $c_i = c_t$ , toutes les valeurs de  $\theta_i$  sont permises ( $-\pi/2 \leq \theta_i \leq \pi/2$ ), et elles généreront l'ensemble des valeurs permises pour  $\theta_t$  ( $\pi/2 \leq \theta_t \leq \pi/2$ ).
- Si  $c_i > c_t$  toutes les valeurs de  $\theta_i$  sont permises ( $-\pi/2 \leq \theta_i \leq \pi/2$ ), et elles généreront un ensemble restreint de valeurs pour  $\theta_t$  ( $-|\arcsin(c_t/c_i)| \leq \theta_t \leq |\arcsin(c_t/c_i)|$ ).
- Si  $c_i < c_t$ , les seules valeurs de  $\theta_i$  permises sont  $-|\arcsin(c_i/c_t)| \leq \theta_i \leq |\arcsin(c_i/c_t)|$ . Elles généreront un ensemble complet de valeurs pour  $\theta_t$ . Aucune onde ne peut pénétrer dans le second milieu pour  $\theta_i < -|\arcsin(c_i/c_t)|$  ou  $\theta_i > |\arcsin(c_i/c_t)|$ .

# 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.

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

**Acoustique physique**

Son

Audition

Musique

## 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

Musique

## 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  $V$ .

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

**Acoustique physique**

Son

Audition

Musique

- 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  $\rho$  par la vitesse du son  $c_{\text{milieu}}$  dans ce même matériel

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

# Acoustique physique

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

**Acoustique physique**

Son

Audition

Musique

- 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  $\rho_1$  et  $\rho_2$  ne correspondent à rien de physique.

# Acoustique physique

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

**Acoustique physique**

Son

Audition

Musique

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)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$Z$ (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

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

**Acoustique physique**

Son

Audition

Musique

Impédance acoustique de différents matériaux.

Matériel	$c$ (m/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$Z$ 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

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

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

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

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

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

# 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

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

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