

<p>Méthodes</p> <p>Introduction</p> <p>Qu'est ce que le son ?</p> <p>Diversité des sons</p> <p>Résonance</p> <p>Propagation</p> <p>Énergie</p> <p>L'équation d'onde</p>	<h1 style="text-align: center;">Son musical (212)</h1> <p style="text-align: center;">Richard Wilson</p> <p style="text-align: center;">(richard.wilson.aero.jussieu.fr)</p> <p style="text-align: center;">Licence de physique de l'UPMC</p> <p style="text-align: center;">May 30, 2006</p>	<p>Méthodes</p> <p>Introduction</p> <p>Qu'est ce que le son ?</p> <p>Diversité des sons</p> <p>Résonance</p> <p>Propagation</p> <p>Énergie</p> <p>L'équation d'onde</p>	<h1 style="text-align: center;">Sommaire</h1> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Introduction</li> <li>2 Qu'est ce que le son ?</li> <li>3 Diversité des sons</li> <li>4 Résonance</li> <li>5 Propagation</li> <li>6 Énergie</li> <li>7 L'équation d'onde</li> </ol>
<p>Méthodes</p> <p>Introduction</p> <p>Qu'est ce que le son ?</p> <p>Diversité des sons</p> <p>Résonance</p> <p>Propagation</p> <p>Énergie</p> <p>L'équation d'onde</p>	<h1 style="text-align: center;">Introduction</h1> <p style="text-align: center;">Les enseignements de l'UE Son Musical</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Qu'est ce que le son ?</li> <li>• Le son musical</li> <li>• Comment analyser les sons ? décomposition en fréquences</li> <li>• Qu'est ce qu'entendre ?</li> <li>• Comment reproduire les sons ? <ul style="list-style-type: none"> <li>• Méthodes analogiques : micro, haut parleurs, enregistrement.</li> <li>• Méthodes numériques : échantillonnage, compression</li> </ul> </li> <li>• Les instruments, les musiques, l'acoustique <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plusieurs instruments (cordes, percussion, vent)</li> <li>• Diversité musicale</li> <li>• Les métiers du son</li> </ul> </li> </ul>	<p>Méthodes</p> <p>Introduction</p> <p>Qu'est ce que le son ?</p> <p>Diversité des sons</p> <p>Résonance</p> <p>Propagation</p> <p>Énergie</p> <p>L'équation d'onde</p>	<h1 style="text-align: center;">Qu'est ce que le son ?</h1> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Une définition : <b>le son est une vibration se propageant dans un milieu matériel</b> (air, eau, solide) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Onde : propagation d'un ébranlement</li> <li>• Pas de transport de matière mais transport d'énergie (mouvement)</li> </ul> </li> <li>• Plusieurs types d'ondes <ul style="list-style-type: none"> <li>• onde transverse</li> <li>• onde longitudinale</li> <li>• onde "mixte" (modes transverse <b>et</b> longitudinaux)</li> </ul> </li> </ul>

## Méthodes

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

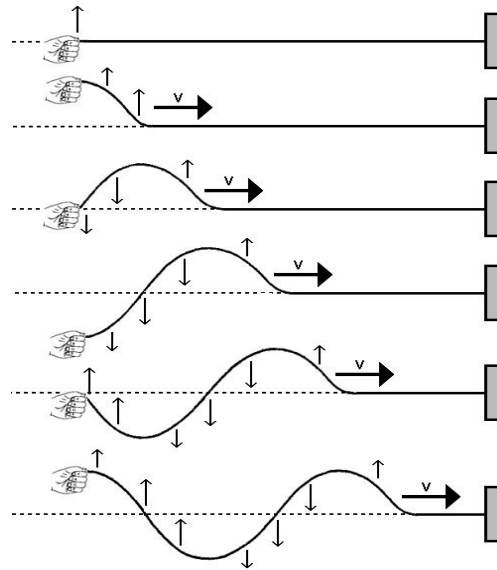
Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

## Onde transverse ...



- le déplacement est perpendiculaire à la direction de propagation.

Ex : caillou dans l'eau

## Méthodes

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

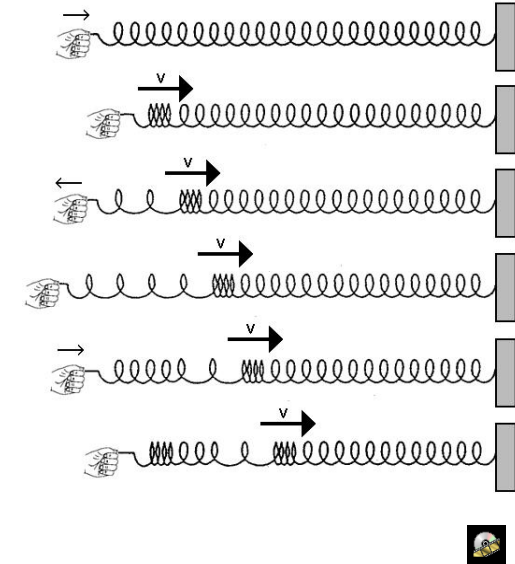
Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

## Onde longitudinale ...



- le déplacement est dans la direction de propagation.

Ex : le son

## Méthodes

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

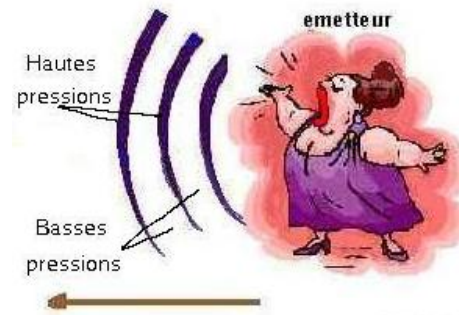
Énergie

L'équation d'onde

## Onde sonore

- Le son est une onde longitudinale de pression se propagent dans un milieu matériel.

Aux fluctuations de pression  $P$  sont associées des fluctuations de densité  $\rho$  et de vitesse  $v$ .



- Les déplacements dus à l'onde sonore sont en général petits (qq  $\mu m$  dans l'air)
- Dans l'air et l'eau les fluctuations de pression sont très faibles comparées à la pression ambiante

## Méthodes

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

## Onde sonore

- L'onde sonore est initiée par une excitation (source) :
  - une percussion, un choc
  - une vibration (corde, voix, moteur ...)
  - le vent lui même contournant un obstacle
- L'onde sonore se propage dans un milieu matériel **élastique** :
  - gaz
  - liquides
  - solides (déformation)

## D'autres types ondes se propagent

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

- Le son n'est pas le seul type d'onde se propageant dans un milieu matériel :
  - vagues, ondes de gravité internes (ondes orographiques) dans l'atmosphère et l'océan;
  - ondes planétaires (cyclones, anticyclones);
  - ondes sismiques.
- Dans tout les cas, les ondes se propagent suite à une excitation extérieure (caillou dans l'eau, relief, tremblement de terre...)
- Les ondes ne peuvent se propager que s'il existe une force de rappel :
  - gravité, forces d'inertie
  - élasticité
  - tension d'un corde, raideur d'un ressort.

## Propagation des ondes dans la matière

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

- Ondes "matérielles" : propagation de proche en proche d'une perturbation dans un milieu matériel.
- Et les ondes électromagnétiques ? (lumière, radio, X, UV ...)
- Jusqu'au début du 20ème siècle, on imaginait qu'un support matériel était nécessaire pour qu'une onde se propage : **l'éther**
- L'éther n'existe pas : les ondes EM se propagent dans le vide et dans les milieux transparents (propagation d'un champ électrique et magnétique)

## Émission d'ondes sonores

Introduction

Qu'est ce que le son ?


Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

- La nature de l'onde sonore (forme, amplitude) dépend de l'excitation, c.à.d. du mouvement de la source.
  - onde de choc (tonnerre, bang supersonique)
  - onde sinusoïdale (écouter )
  - onde quasi-périodique.
- L'excitation la plus simple : oscillateur harmonique  $\implies$  mouvement sinusoïdal
- Les ondes sonores peuvent être analysées comme une superposition d'ondes harmoniques.

## Onde périodique

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

- On caractérise une onde périodique se propageant par
    - sa période  $T$
    - sa longueur d'onde  $\lambda$
- ondep.mpg" Une onde progressive
- L'amplitude de l'onde est fonction de la distance  $x$  et du temps  $t$

$$A(x, t) \propto \cos(kx - \omega t)$$

où  $k = 2\pi/\lambda$  et  $\omega = 2\pi/T$ .

## Forme d'onde

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

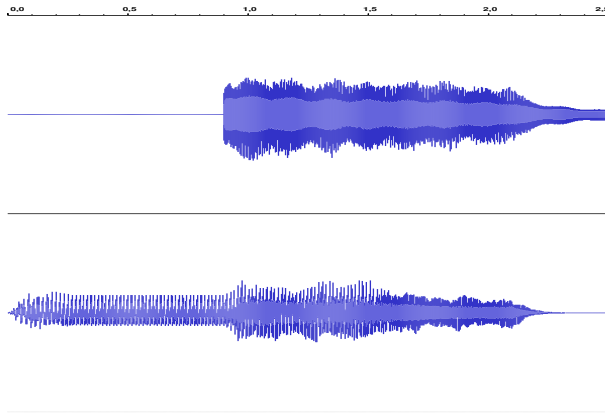
Propagation

Énergie

L'équation d'onde

- Une onde sonore complexe est décrite par sa **forme d'onde**.

- Enveloppe de l'amplitude des fluctuations.
- Description temporelle



## Corde vibrante : Résonance

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

- Considérons une corde tendue que l'on fait vibrer. Quelle est la fréquence "naturelle" de cette corde ?
- La vibration est une onde transverse. La période de résonance est telle que à chaque vibration correspond un aller-retour de l'ébranlement, soit

$$T = \frac{2L}{v} \Leftrightarrow f = \frac{v}{2L}$$

où  $L$  est la longueur de la corde,  $v$  la vitesse de propagation de l'ébranlement.

## Corde vibrante : Résonance

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

Comment exprimer la vitesse  $v$  de propagation d'un ébranlement dans une corde ?

À priori,  $v$  dépend de la tension  $T$  de la corde et de son inertie (masse), plus précisément de sa masse par unité de longueur  $\mu$ .

$$v = C \times T^\alpha \mu^\beta$$

où

$$[T] = MLT^{-2} \quad \text{et} \quad [\mu] = ML^{-1}$$

La seule possibilité est

$$v = C \left( \frac{T}{\mu} \right)^{1/2}$$

On observe qu'effectivement  $v = \sqrt{T/\mu}$ .

## Corde vibrante : Résonance

La fréquence fondamentale est donc :

$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Cette fréquence correspond à une longueur d'onde  $\lambda_0 = \frac{v}{f_0}$

Cette fréquence de résonance n'est pas unique. Considérons en effet des vibrations de longueur d'onde

$$\lambda_1 = L \quad \rightarrow \quad f_1 = 2f_0$$

$$\lambda_{2/3} = \frac{2}{3}L \quad \rightarrow \quad f_{2/3} = 3f_0$$

$$\lambda_{1/2} = \frac{1}{2}L \quad \rightarrow \quad f_{1/2} = 4f_0$$

## Méthodes

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

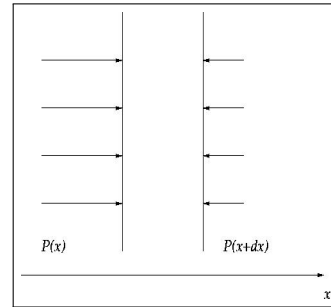
Énergie

L'équation d'onde

## Impédance sonore

- La pression est une force par unité de surface ( $\text{N}/\text{m}^2$ )

À une différence de pression correspond une force exercée sur un élément de volume de fluide.



## Méthodes

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

## Impédance sonore

- Par analogie avec l'oscillateur harmonique on comprend que les fluctuations de vitesses et de pression sont en phase (ou en opposition de phase).
- En effet, la vitesse s'annule quand la force, c.à.d. le gradient de pression, est maximum, donc quand la pression (acoustique) s'annule. (la dérivée d'un sinus est maximum quand le sinus s'annule)

## Méthodes

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

## Impédance sonore

- Principe fondamental de la dynamique :

$$\rho \frac{\partial v_1}{\partial t} = - \frac{\partial P_1}{\partial x}$$

- La variation de vitesse pendant  $T/4$  est de l'ordre de  $v_1$ . De même la variation de pression sur une distance  $\lambda/4$  est de l'ordre de  $P_1$ . En conséquence :

$$\rho \frac{v_1}{T/4} \approx \frac{P_1}{\lambda/4}$$

soit  $P_1 \approx \rho c_s v_1$  ( $P_1$  et  $v_1$  sont les amplitudes des fluctuations de pression et de vitesse).

## Méthodes

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

## Réflexion et transmission

- L'amplitude de la fluctuation de vitesse  $v_1$  est donc proportionnelle à la fluctuation de pression  $P_1$

$$P_1 = K v_1$$

où  $K = \rho c_s$  est l'impédance du milieu.

- Se produit une réflexion et transmission lorsque survient une discontinuité d'impédance :
  - Obstacles
  - Interface entre 2 milieux (eau, air)
  - Sortie d'un tuyau (tuyau d'orgue, pavillon ...)

## Méthodes

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

## Quelques ordres de grandeur

- Considérons un son d'intensité moyenne (60 dB) de fréquence 400 Hz. On mesure l'amplitude de fluctuation de pression (la pression acoustique)  $P_1$  :

$$P_1 \sim 3 \times 10^{-2} \text{ Pa}$$

- Dans l'air, l'impédance sonore  $K$  est de l'ordre de

$$K = \rho c \sim 400 \text{ Kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$$

- L'amplitude des fluctuations de vitesse est :

$$v_1 = P/K \sim 7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

- Le déplacement d'air associé  $\delta x$  est :

$$\delta x \approx v_1 T/8 \sim 10^{-6} \text{ m} \quad !!!$$

## Méthodes

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

## Vitesse de propagation des ondes sonores

- Pression dans un fluide : résulte du choc des molécules → force par unité de surface.

Pour un gaz (parfait)

$$P = nkT$$

( $P$  pression,  $n$  nombre de molécules par unité de volume,  $T$  température)

- La vitesse quadratique des molécules dépend de la température (1er principe de la thermodynamique)

$$E_c = n \frac{3}{2} kT = n \frac{1}{2} m v^2$$

( $v \sim$  vitesse (module) moyenne des molécules)

•

$$v = \sqrt{3kT/m} \approx 500 \text{ m.s}$$

## Méthodes

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

## Vitesse de propagation

- La vitesse de propagation du son,  $c_s$ , est très proche de la vitesse des molécules

$$c_s = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}} \approx \frac{v}{\sqrt{2}} \approx 350 \text{ m/s}$$

- Les ondes sonores ne sont pas **dispersives** : la vitesse de propagation est la même quelle que soit leur fréquence.

## Méthodes

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

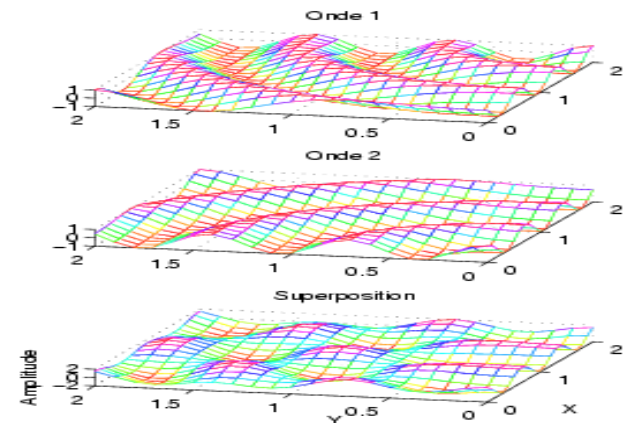
Propagation

Énergie

L'équation d'onde

## Interférences, battements

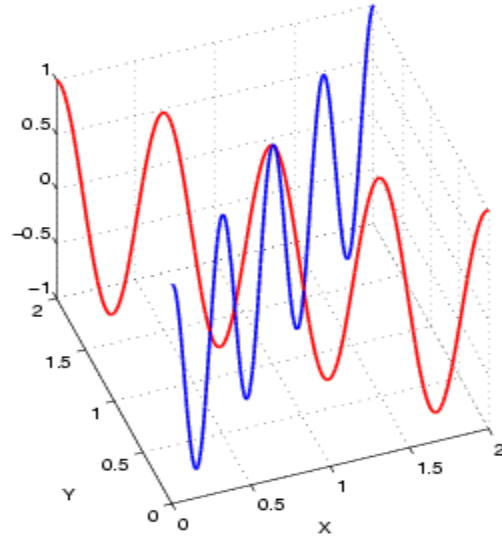
- La superposition de deux ondes de même longueur d'onde produit des interférences.



Méthodes

Introduction  
Qu'est ce que le son ?  
Diversité des sons  
Résonance  
Propagation  
Énergie  
L'équation d'onde

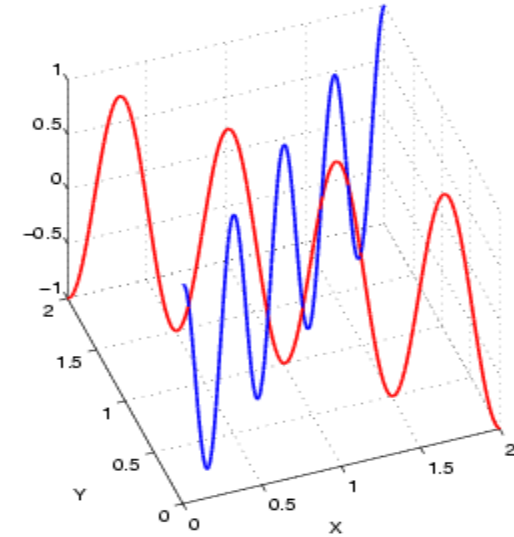
### Interférences (constructives)



Méthodes

Introduction  
Qu'est ce que le son ?  
Diversité des sons  
Résonance  
Propagation  
Énergie  
L'équation d'onde

### Interférences (destructives)

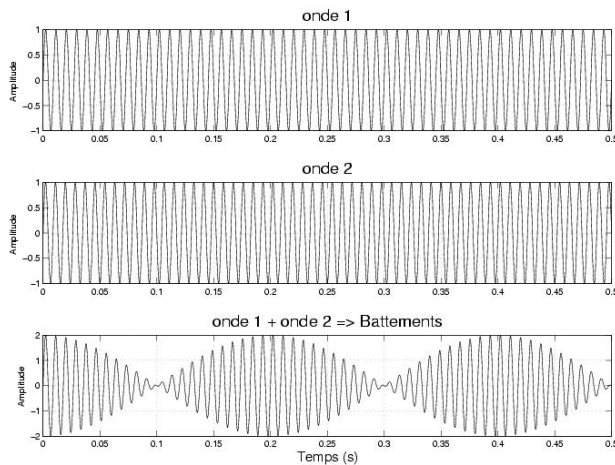


Méthodes

Introduction  
Qu'est ce que le son ?  
Diversité des sons  
Résonance  
Propagation  
Énergie  
L'équation d'onde

### Battements

- La superposition de deux ondes de longueur d'onde proches produit un phénomène de battement (interférence temporelle).



Méthodes

Introduction  
Qu'est ce que le son ?  
Diversité des sons  
Résonance  
Propagation  
Énergie  
L'équation d'onde

### Effet Doppler (1)

Imaginons une source sonore immobile.

<p>Méthodes</p> <p>Introduction</p> <p>Qu'est ce que le son ?</p> <p>Diversité des sons</p> <p>Résonance</p> <p><b>Propagation</b></p> <p>Énergie</p> <p>L'équation d'onde</p>	<h2 style="text-align: center;">Effet Doppler (2)</h2> <p style="text-align: center;">Lorsque que la source sonore se meut...</p>	<p>Méthodes</p> <p>Introduction</p> <p>Qu'est ce que le son ?</p> <p>Diversité des sons</p> <p>Résonance</p> <p><b>Propagation</b></p> <p>Énergie</p> <p>L'équation d'onde</p> <h2 style="text-align: center;">Effet Doppler</h2> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Soit <math>v</math> la vitesse relative de la cible par rapport au récepteur. (<math>v &gt; 0</math> pour une cible s'éloignant).</li> <li>• Les fronts d'onde parviennent au récepteur avec une période <math>T_R</math> :</li> </ul> $T_R = \frac{\lambda + vT}{c}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• La fréquence perçue (fréquence <b>Doppler</b>) est :</li> </ul> $f_D = \frac{1}{T_R} = \frac{f}{1 + v/c}$
<p>Méthodes</p> <p>Introduction</p> <p>Qu'est ce que le son ?</p> <p>Diversité des sons</p> <p>Résonance</p> <p><b>Propagation</b></p> <p>Énergie</p> <p>L'équation d'onde</p>	<h2 style="text-align: center;">Effet Doppler (3)</h2> <p style="text-align: center;">Lorsque que la source sonore se meut à la vitesse du son</p>	<p>Méthodes</p> <p>Introduction</p> <p>Qu'est ce que le son ?</p> <p>Diversité des sons</p> <p>Résonance</p> <p><b>Propagation</b></p> <p>Énergie</p> <p>L'équation d'onde</p> <h2 style="text-align: center;">Effet Doppler (4)</h2> <p style="text-align: center;">Lorsque que la source sonore se meut plus vite que la vitesse du son</p>



## Méthodes

## Énergie d'une onde sonore

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

- L'énergie est proportionnelle au carré des amplitudes des fluctuations (de vitesse, de densité, de pression). Une masse  $m$  d'air, animée d'une fluctuations de vitesse d'amplitude  $v_1$  aura une énergie cinétique :

$$E_c = \frac{1}{2} m \overline{v_1^2} = \frac{1}{4} m v_1^2$$

- Comme il y a équi-partition entre énergie cinétique et potentielle, l'énergie totale est :

$$E = \frac{1}{2} m v_1^2$$

## Méthodes

## Énergie d'une onde sonore

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

- L'énergie par unité de volume est :

$$E_v = \frac{E}{m} = \frac{1}{2} \rho v_1^2$$

- Pour caractériser l'énergie d'une onde sonore reçue, il est plus pertinent d'évaluer l'énergie reçue par unité de surface et de temps, c.à.d. le **flux d'énergie** :

$$I = E_v \times c_s \quad \text{où } c_s \text{ est la vitesse de l'onde sonore}$$

## Méthodes

## Intensité d'une onde sonore

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

- En fonction de l'amplitude des fluctuations de vitesse,  $I$  s'écrit :

$$I = \frac{1}{2} \rho v_1^2 c_s$$

- En fonction de la pression acoustique  $P_1 = (\rho c_s) v_1$ ,

$$I = \frac{1}{2} \frac{P_1^2}{\rho c_s}$$

- Unité de  $I$  ?

$$[I] \equiv \left( \frac{MLT^{-2}}{L^2} \right)^2 \times \frac{1}{ML^{-3}LT^{-1}} \equiv \frac{ML^2T^{-3}}{L^2}$$

$$\text{soit } [I] \equiv \text{Watt}/m^2 \text{ (système d'unités MKS)}$$

## Méthodes

## Dynamique des intensités sonores

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

- Les pressions acoustiques perceptibles dans l'air sont d'environ

$$P_{min} \approx 3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

Ce qui équivaut à une intensité minimum,  $I_{min}$ , de

$$I_{min} = \frac{1}{2} \frac{P_{min}^2}{\rho c}$$

soit

$$I_{min} \approx 10^{-12} \text{ W}/m^2$$

- Les pressions acoustiques (in)supportables (douloureuses) sont de l'ordre de 1 Watt/ $m^2$ , soit  $I_{ins} \times 10^{12}$ .

## Échelle Bell

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

- **Loi de Weber** : la sensation d'une différence d'intensité est proportionnel à la quantité  $\implies$  échelle logarithmique : le déciBell (dB).

$$I_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_{min}} \right)$$

- Ainsi, un son (in)supportable ( $1 \text{ W/m}^2$ ) a une intensité

$$I_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{I_{min}} \right) = 120 \text{ dB}$$

L'intensité d'une conversation est d'environ 60 dB, ce qui correspond à un flux d'énergie  $I$  :

$$I \approx I_{min} 10^{I_{dB}/10} = 10^{-6} \text{ W/m}^2$$

## Atténuation de l'intensité sonore

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

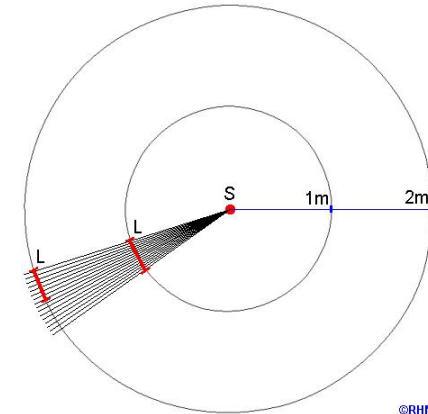
Énergie

L'équation d'onde

- Considérons une source sonore isotrope.
  - Soit  $I_s$  l'intensité de la source.
  - Quelle est l'intensité perçue à une distance  $r$  de la source ?

L'énergie est conservée.  
Le flux d'énergie est fonction de la distance  $r$

$$I(r) = \frac{I_s}{4\pi r^2}$$



©RHM

## Équation d'onde

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

- On décompose les variables en un terme moyen et un terme de fluctuation (décomposition de Reynolds).

$$P = P_0 + P_1 \quad ; \quad \rho = \rho_0 + \rho_1 \quad ; \quad x = x_0 + x_1$$

- À partir de l'équation du mouvement (1), de conservation de la masse (2), et de l'équation d'état (3), on établit l'équation d'onde.

(1) Principe de la dynamique	$\rho_0 \frac{\partial^2 x_1}{\partial t^2} - \frac{\partial P_1}{\partial x}$
(2) Conservation de la masse	$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} = -\rho_0 \frac{\partial x_1}{\partial x}$
(3) Équation d'état	$P = P(\rho) \implies P_1 = \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right) \rho_1$

## Équation d'onde

Introduction

Qu'est ce que le son ?

Diversité des sons

Résonance

Propagation

Énergie

L'équation d'onde

- Combinant ces trois équations on obtient l'équation d'onde :

$$\frac{\partial^2 x_1}{\partial t^2} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 x_1}{\partial x^2}$$

où l'on a noté  $c_s^2 = \partial P / \partial \rho$ . La solution de cette équation est de la forme

$$x_1(t) = f_1(x - c_s t) + f_2(x + c_s t)$$

- La solution harmonique est un cas particulier :

$$x_1(t) = A \cos(k(x - c_s t)) + B \cos(k(x + c_s t))$$

où  $k$  est le nombre d'onde ( $k = 2\pi/\lambda$ ).