IUT qualité,
logistique industrielle et organisation

Ondes élastiques
& Acoustique

http://pagesperso-orange.fr/fabrice.sincere

Chapitre 2 Ondes élastiques dans les fluides et les solides

1-1- Introduction : classification des ondes acoustiques

- Sons audibles : $20 < f < 16\,000$ Hz (bande passante de l'oreille humaine)
  - son grave : 20 à 500 Hz
  - son médium : 500 à 4000 Hz
  - son aigu : 4 à 16 kHz

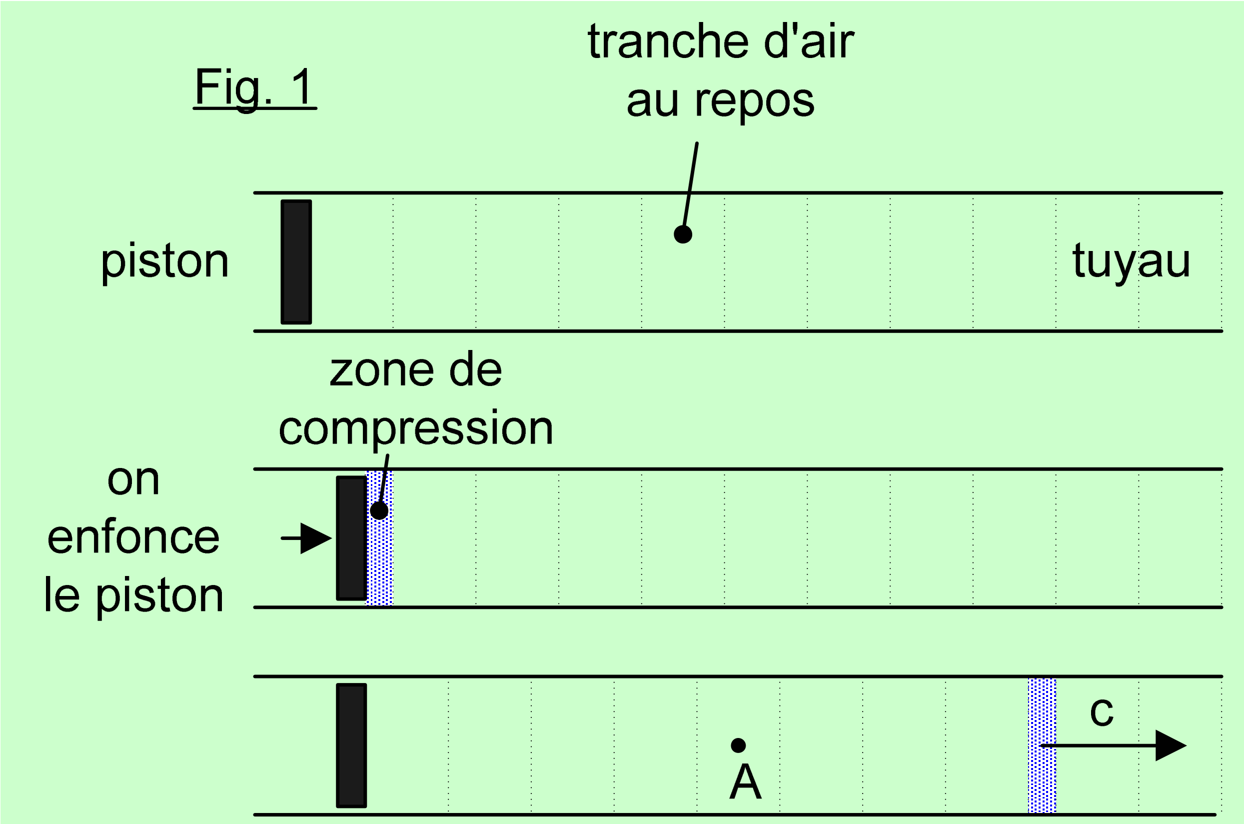
- Infrasons : $f < 20$ Hz
- Ultrasons : $f > 16$ kHz
- Hypersons : $f > 1$ GHz

1-2- Ondes élastiques dans les fluides

Fluide : gaz ou liquide

On suppose les fluides parfaits (pas d’absorption).

1-2-1- Propagation d’une onde élastique plane dans l’air



Il y a propagation par compression ou dilatation : l’onde est longitudinale.

Une onde élastique dans l’air correspond à la propagation d’une ***variation de pression***.

1-2-2- Pression acoustique (ou pression relative)

Définition : **$p = P - P_0$**

P : pression absolue du fluide

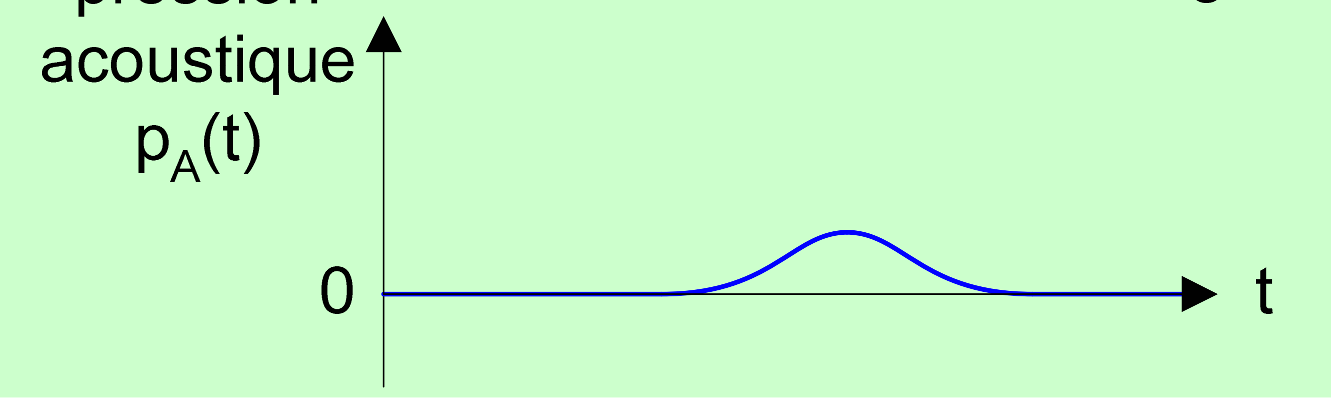
P_0 : pression absolue au repos

$p > 0$: compression

$p < 0$: dilatation

Plaçons un capteur de pression (microphone) au point A :

Fig. 2



1-2-3- Propagation d’une onde sonore plane sinusoïdale

Le piston a maintenant un mouvement sinusoïdal de fréquence f :

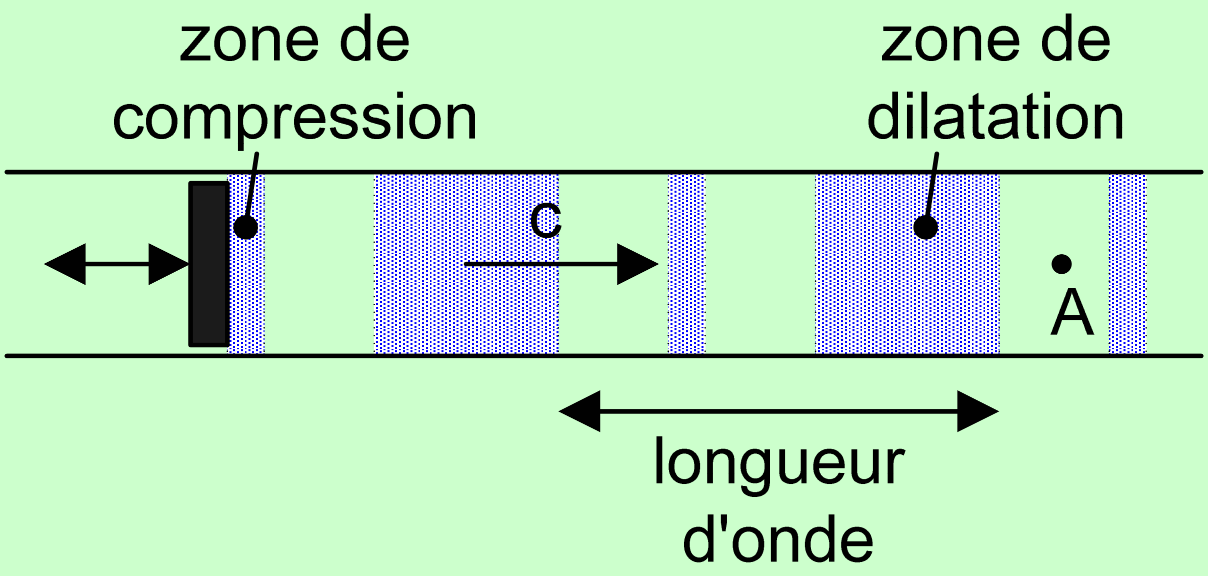
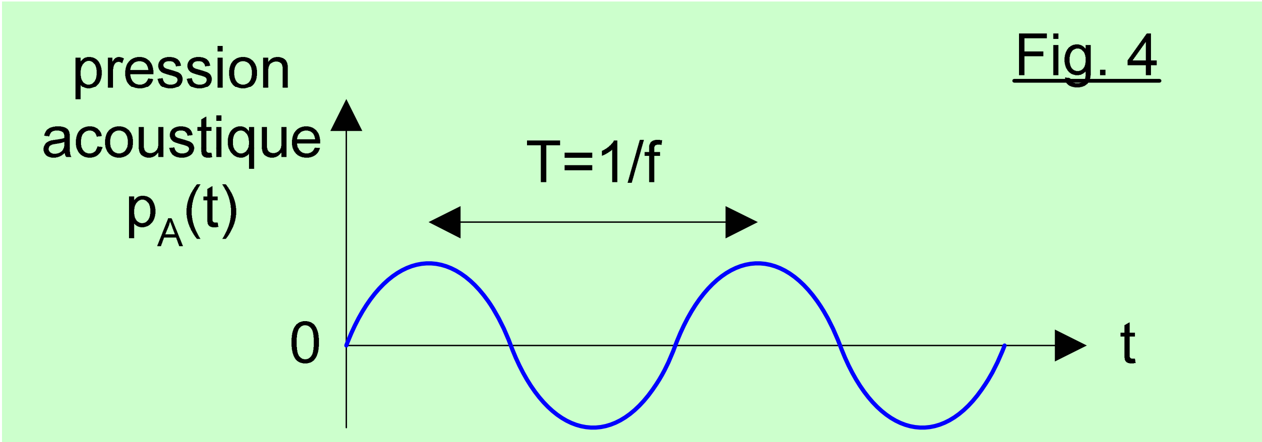


Fig. 3

Un son de fréquence f se propage.

• Pression acoustique en A :



1-2-4- Source sonore

Une source sonore est une ***surface vibrante*** mettant en mouvement le milieu environnant.

Ex. 1 : voix humaine (cordes vocales)

Ex. 2 : haut-parleur (vibration d’une membrane)

1-2-5- Surface d’onde (ou front d’onde) et rayon acoustique

L’ensemble des points atteints au même instant par une onde est appelé ***surface d’onde***.

Tous les points d’une surface d’onde vibrent ***en phase***.

• Onde plane

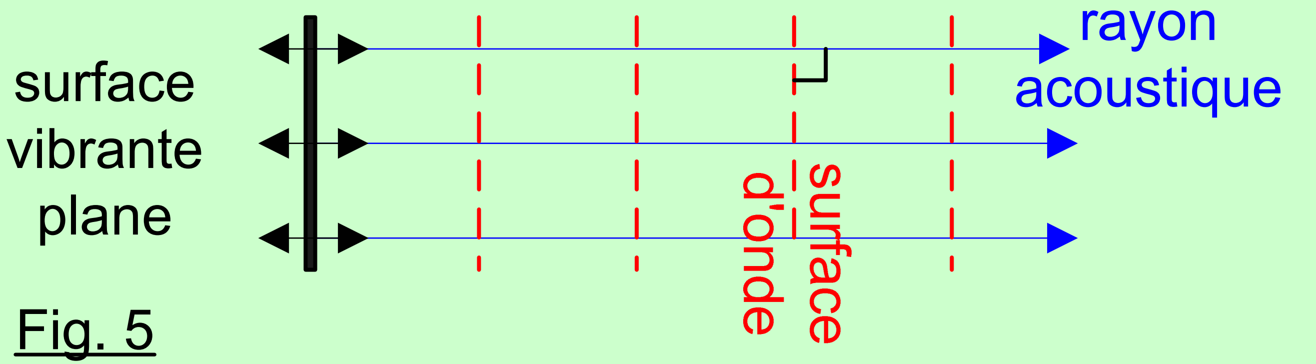
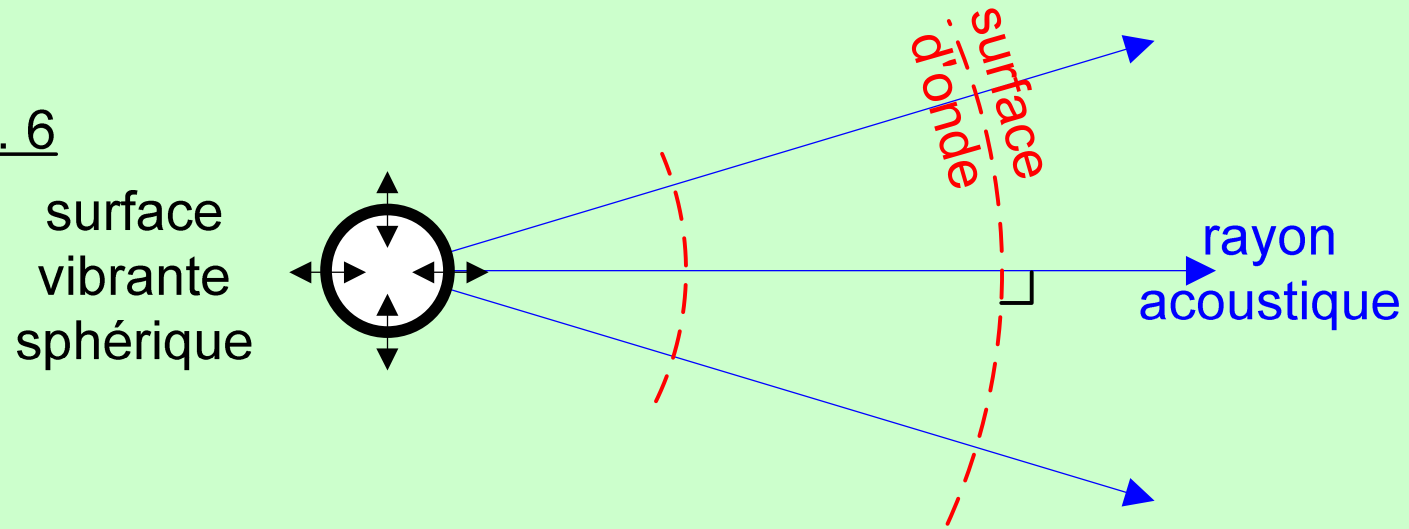


Fig. 5

• Onde sphérique

Fig. 6



1-2-6- Célérité du son dans les fluides

- Equation de propagation : $$\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} = \rho\chi_S \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2}$$

$$\text{d'où :} \quad c = \sqrt{\frac{1}{\rho\chi_S}} \qquad (1)$$

ρ : masse volumique (en kg/m^3)

χ_S : coeff. de compressibilité adiabatique (en Pa^{-1})

Remarque : χ_S des gaz >> χ_S des liquides

• Cas des gaz parfaits

$$\chi_S = \frac{1}{\gamma P} \qquad (2)$$

D'autre part : $PV_{molaire} = RT$

$\rho = M/V_{molaire}$ (M masse molaire du gaz)

d'où : $P/\rho = RT/M \quad (3)$

Finalement :

(1) (2) (3) $$\boxed{c = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}}}$$

- c en m/s
- T en kelvin
- M en **kg**/mol
- $R \approx 8{,}314 \ \mathrm{J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}}$

Remarques :

- célérité indépendante de la pression du gaz
- $\gamma = 5/3$ pour les gaz monoatomiques
- $\gamma = 7/5$ " diatomiques (O_2, N_2 …)

• Cas particulier de l'air

L'air est un mélange d'environ 20 % de O_2 et de 80 % de N_2 :

$$M_{air} = \frac{20\times M(O_2)+80\times M(N_2)}{100}$$

$$= \frac{20\times 32+80\times 28}{100} = 29\ \text{g/mol}$$

$\gamma_{air} = 1{,}41$

d'où : $\boxed{c_{air}(m/s) \approx 20\sqrt{T(K)}}$

Aux températures usuelles :

c_{air} (m/s) ≈ 330 + 0,6 T(°C)

A.N. 330 m/s à 0°C

342 m/s à 20°C

- Cas des liquides

$$\boxed{c = \sqrt{\frac{1}{\rho \chi_S}}}$$

A.N. célérité du son dans l'eau

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

$1/\chi_S = 2{,}1 \cdot 10^9 \text{ Pa}$

d'où : $\mathbf{c_{eau} \approx 1480 \text{ m/s}}$

1-2-7- Réflexion et transmission des ondes sonores

• Lois de Snell-Descartes :

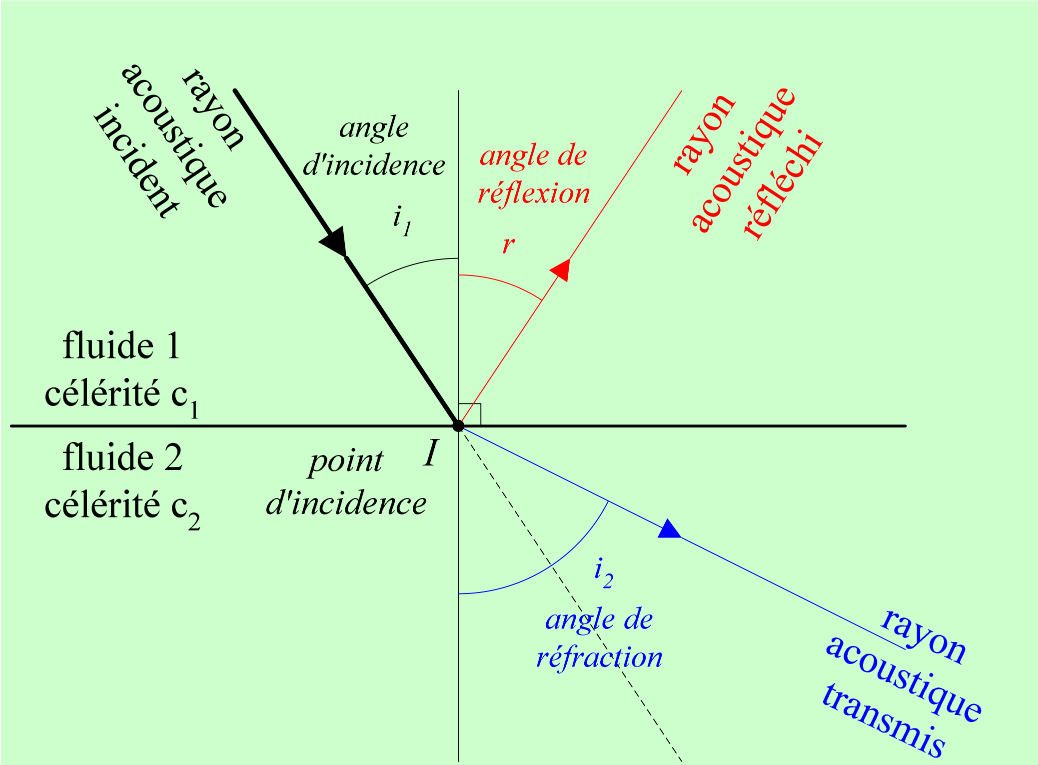


Fig. 7

Loi de la réflexion : **$r = i_1$**

Loi de la réfraction : $$\boxed{\frac{\sin i_1}{c_1} = \frac{\sin i_2}{c_2}}$$

• Aspect énergétique

Impédance acoustique : **$Z = \rho c$** $[\mathrm{kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}}]$

Coeff. de réflexion énergétique (sous incidence normale) :

$$\boxed{R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2}$$

A.N. passage du son de l'air dans l'eau

$$Z_{eau} = \rho_{eau} c_{eau} = 1000 \times 1480 = 1{,}48 \cdot 10^6 \ \mathrm{kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}}$$

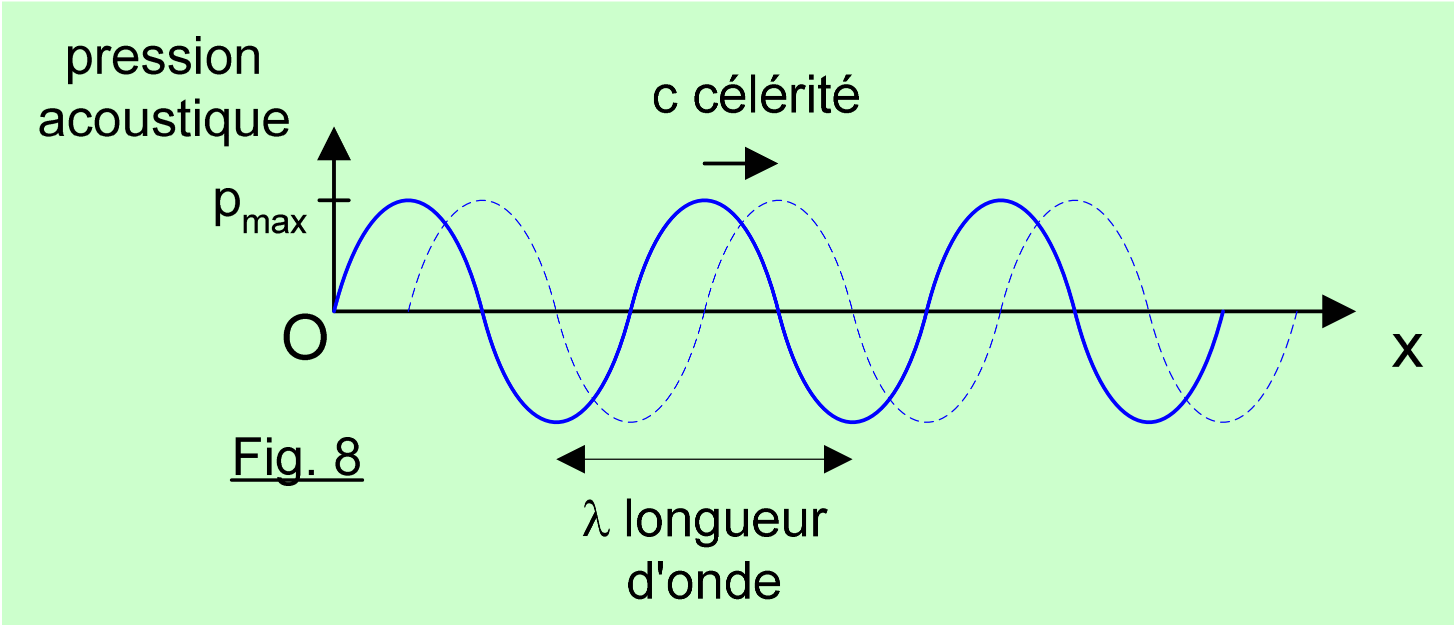
$$Z_{air} = \rho_{air} c_{air} = 1{,}29 \times 342 = 440 \ \mathrm{kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}}$$

$R = 99{,}88\ \%$

$T = 0{,}12\ \%$ $\Rightarrow$ forte atténuation du son transmis

1-2-8- Pression acoustique efficace d'un son

Considérons une onde plane progressive sinusoïdale :



La pression acoustique s'écrit : $p(x,t) = p_{max} \sin[\omega t - kx + \varphi]$

Par définition : $\boxed{p_{eff} = \dfrac{p_{max}}{\sqrt{2}}}$

1-2-9- Intensité acoustique d'un son

• Définition : l'intensité acoustique **I** d'une onde progressive est la puissance qu'elle transporte par unité de surface.

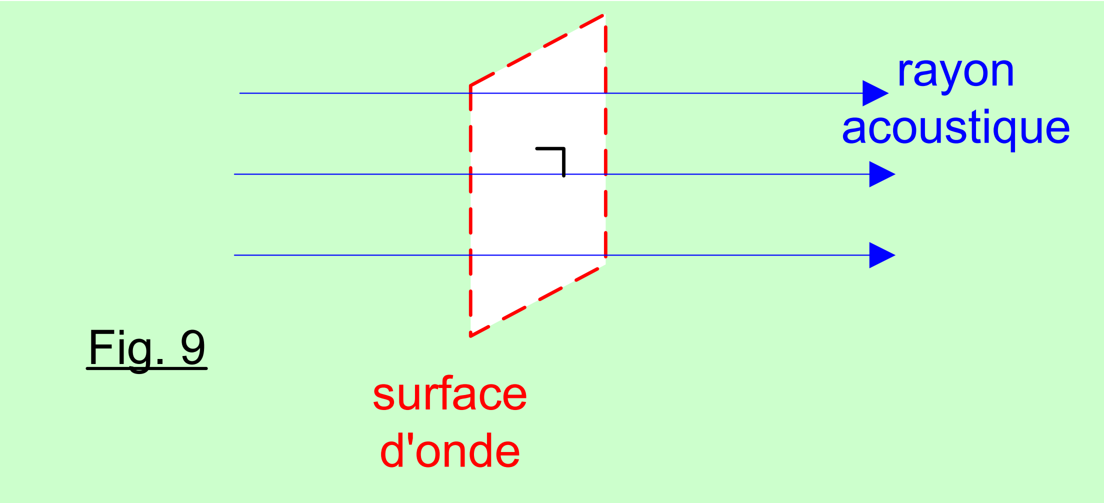


Fig. 9

$$\boxed{I\,[W/m^2] = \frac{\text{puissance acoustique}\,[W]}{\text{surface}\,[m^2]}}$$

On montre que : $I = \dfrac{{p_{eff}}^2}{Z} \qquad \dfrac{[Pa^2]}{[kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]}$

1-2-10- Niveau d'intensité acoustique (SPL Sound Pressure Level)

Définition :

$$\boxed{L(\mathrm{dB}) = 10\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)}$$

$I = I_0$: $L = 0$ dB

$I_0 = 10^{-12}$ W/m² : seuil d'audibilité dans l'air de l'oreille humaine pour un son sinusoïdal de 1 kHz.

Autre écriture :

$$\boxed{L(\mathrm{dB}) = 20\log_{10}\left(\frac{p_{eff}}{p_{eff\,0}}\right)}$$

$$I_0 = \frac{{p_{eff\,0}}^2}{Z_{air}}$$

$$\text{d'où :} \quad p_{eff\,0} = \sqrt{10^{-12} \cdot 440} = 20\,\mu\mathrm{Pa}$$

• Remarque

sensibilité relative de l'oreille à 1 kHz :

$p_{eff\ 0}$ / P_{atm} = $20 \cdot 10^{-6}/101\ 325 = 2 \cdot 10^{-10}$!

Ceci correspond à une vibration de l'air d'amplitude 10^{-11} m !

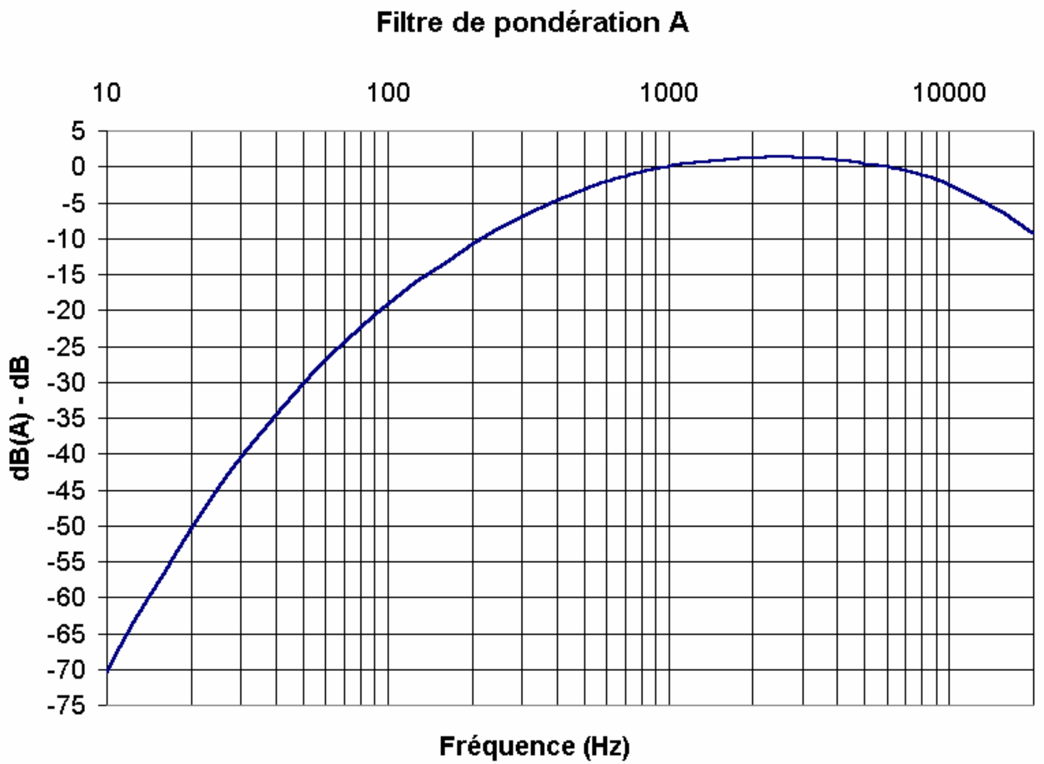
$I_0 \times 1$ cm² (surface d'un tympan) : 10^{-16} W !

• <u>Tableau 1</u>

	L (dB)	I (W/m²)	p_{eff} (Pa)
Seuil d'audition	0	10^{-12}	$2 \cdot 10^{-5}$
Bruissement des feuilles	20	10^{-10}	$2 \cdot 10^{-4}$
Conversation vive	60	10^{-6}	$2 \cdot 10^{-2}$
Seuil de douleur	120	1	20

1-2-11- Filtre de pondération A

L’oreille a une sensibilité qui dépend de la fréquence (fig.10) :



Le **dB(A)** exprime la sensation auditive de l’oreille.

Ex.	60 dB à 1 kHz	⇔	60 dB(A)
	60 dB à 100 Hz	⇔	60 - 19 = 41 dB(A)
	79 dB à 100 Hz	⇔	79 - 19 = 60 dB(A)

1-2-12- Différence de niveau acoustique

1er son :	$L_1(dB)$	$I_1(W/m^2)$
2ème son :	L_2	I_2

- **$\Delta L(dB) = L_1 - L_2$**

- Autre expression :

$$\Delta L = 10\log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) - 10\log\left(\frac{I_2}{I_0}\right)$$

$$= \mathbf{10 \cdot \log_{10}\left(\frac{I_1}{I_2}\right)}$$

1-2-13- Atténuation

Atténuation (dB) = niveau d'entrée (dB) - niveau de sortie (dB)

$$= 10\log\left(\frac{I_{\text{entrée}}}{I_{\text{sortie}}}\right)$$

- Application : atténuation du son transmis de l'air dans l'eau

$$\textbf{Atténuation (dB)} = 10\log\left(\frac{I_{\text{incident}}}{I_{\text{transmis}}}\right) = 10\log\left(\frac{1}{T}\right)$$

$$= \mathbf{-10 \cdot \log_{10} T}$$

A.N. T = 0,12 %

⇔ atténuation de 29 dB

1-2-14- Intensité acoustique et formes d'ondes

• Onde plane : l'intensité est indépendante de la distance à la source (en l'absence d'absorption) : I = cte L = cte

• Onde sphérique : *dilution* de l'énergie dans l'espace : r↗ I↘ L↘

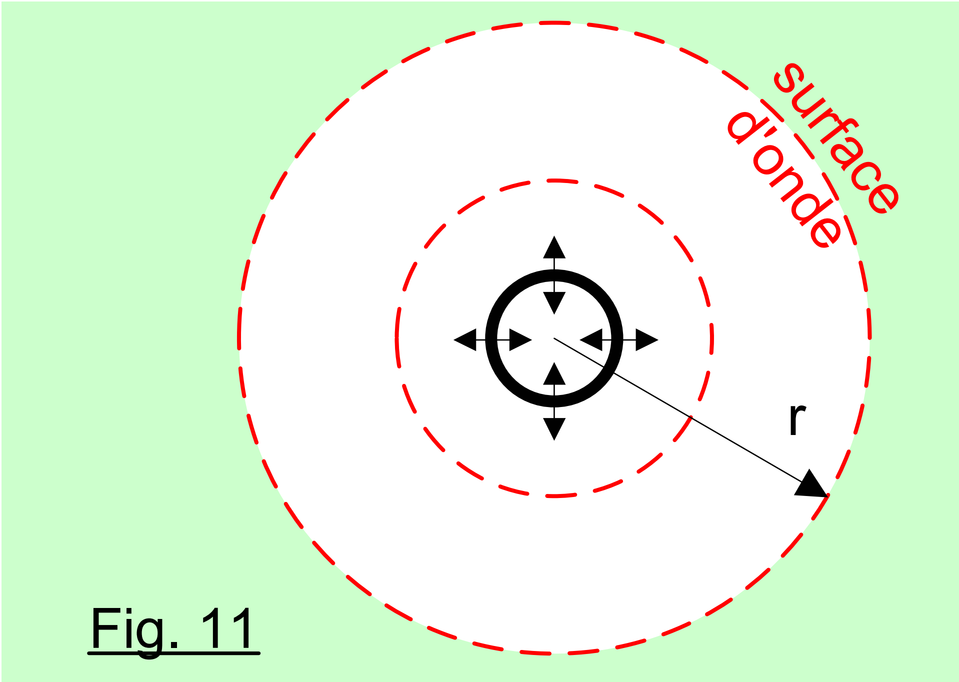


Fig. 11

Soit P la puissance acoustique de la source : $I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4\pi r^2}$ $\quad I \;\alpha\; \frac{1}{r^2}$

Atténuation du son avec la distance

niveau à la distance r_1 (dB) - niveau à la distance r_2 (dB)

$$= 10\log\left(\frac{I_{r1}}{I_{r2}}\right) = 10\log\left(\frac{r_2^{\,2}}{r_1^{\,2}}\right) = 20\log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

distance multipliée par 10 : atténuation de 20 dB

" 2 : " 6 dB

Ex. Haut-parleur 80 W (puissance électrique nominale)

89 dB/W/m (⇔ 89 dB à 1 m pour 1 W)

On suppose les ondes sphériques :

P_e = 1 W : 83 dB à 2 m 77 dB à 4 m 69 dB à 10 m …

P_e' = 80 W : $\Delta L = 10\log\left(\frac{I'}{I}\right) = 10\log(80) = 19\,\text{dB}$

108 dB à 1 m 102 dB à 2 m …

1-2-15- Absorption des ondes sonores

- En réalité, il y a perte d'énergie sonore par :
    - échange de chaleur
    - viscosité (frottement)
    - diffusion …
- Loi d'absorption (loi de Beer) pour une onde plane : $\boxed{I(x) = I(0)e^{-kx}}$

x : distance à la source (en m)

k : coefficient d'absorption (en m^{-1})

$k \approx A f^{2}$

A : constante qui dépend du milieu de propagation

f : fréquence du son en Hz

• Remarque :

L'absorption augmente rapidement avec la fréquence.

Conséquence : les sons graves se propagent plus loin que les aigus.

• Coefficient d'absorption en dB/m

On montre que : $\alpha(\mathrm{dB/m}) = \dfrac{10}{\ln 10} k = 4{,}34\, k\ (\mathrm{m}^{-1})$

• **Atténuation due à l'absorption (dB)= $\alpha\times$distance parcourue (m)**

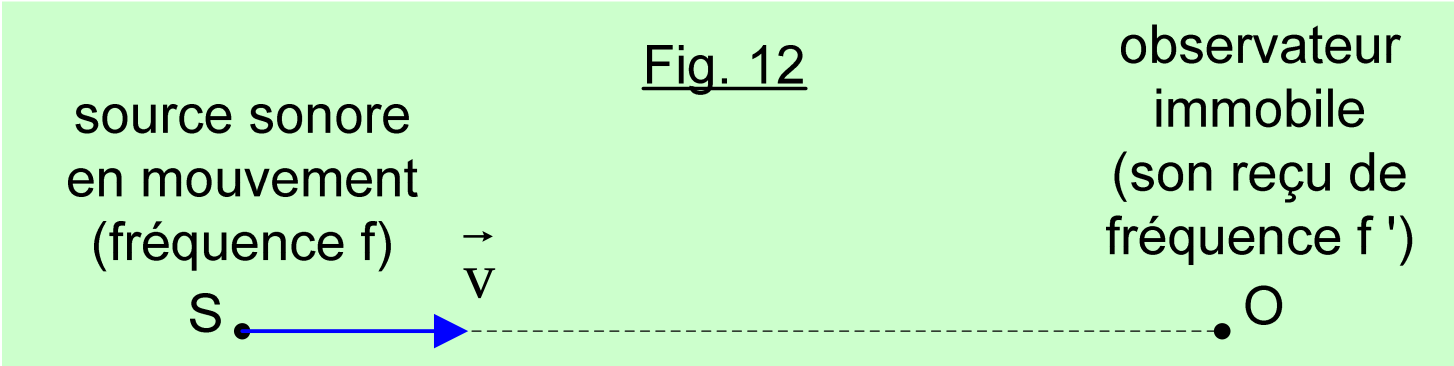
Ex.	eau	f = 500 Hz	$\alpha = 10^{-4}$ dB/km
		f = 1,6 MHz (ultrasons)	$\alpha = 1$ dB/m

L'air absorbe beaucoup plus que l'eau :

f = 500 Hz	$\alpha = 2{,}8$ dB/km

1-2-16- Effet Doppler-Fizeau

• Expérience



• Observation

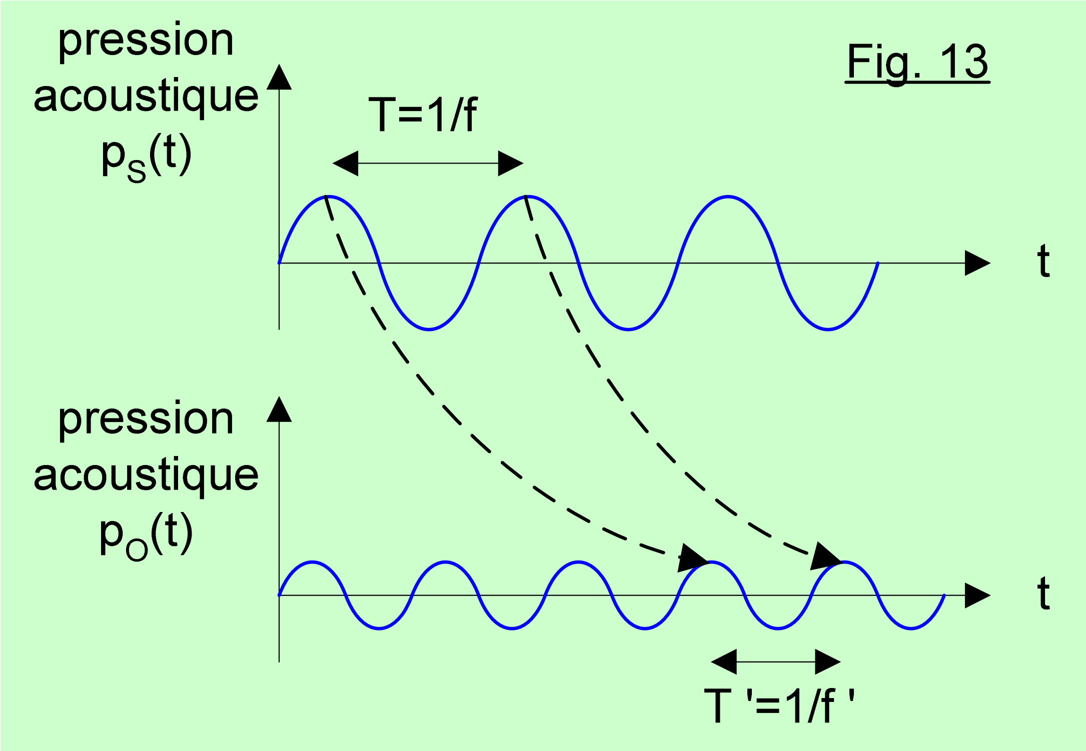
Décalage en fréquence ($\Delta f = f' - f$) : c'est l'effet Doppler.

De plus : $\Delta f > 0$ quand la source se rapproche (son plus aigu)

$\Delta f < 0$ quand la source s'éloigne (son plus grave)

$|v| \nearrow$ $|\Delta f| \nearrow$

• Justification



Le son émis à l'instant t est réçu à l'instant :

t'= t + d/c

d : distance S-O

c : vitesse du son

Le son émis à l'instant t+T est réçu à l'instant :

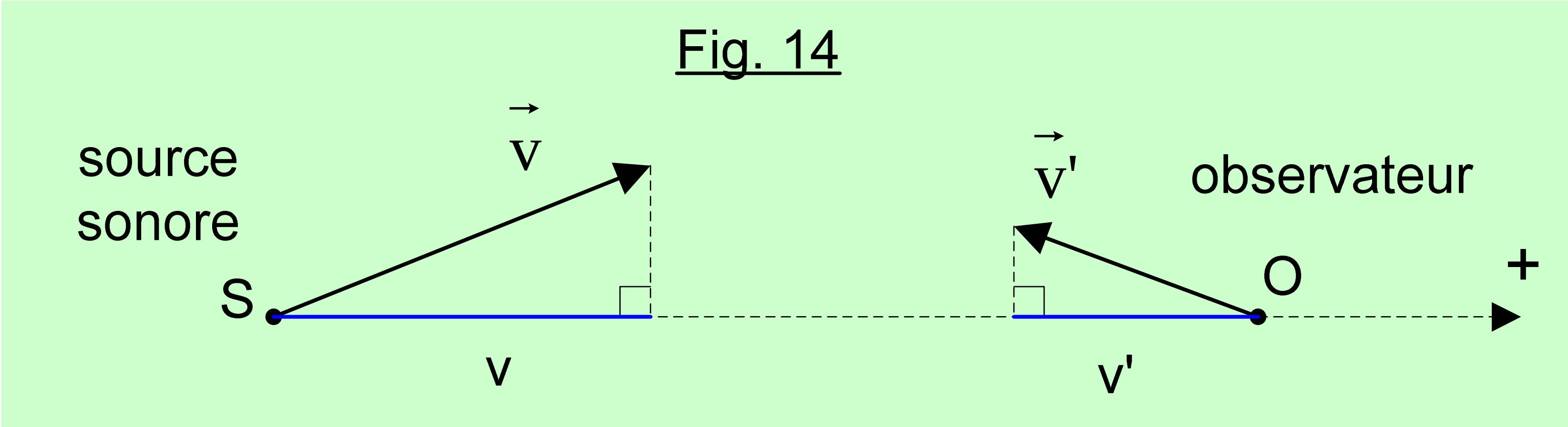
t''= t +T + (d - vT)/c

T' = t''- t' = T - vT/c = T(c - v)/c

$$\boxed{f' = f\,\frac{c}{c-v}}$$

(v > 0 quand la source se rapproche : f ' > f)

• Cas général : observateur mobile



$$\boxed{f' = f\,\frac{c - v'}{c - v}}$$

v : vitesse radiale de la source

v’ : “ l’observateur

- Application : mesure indirecte de la vitesse ($\Delta f \Rightarrow v$)

  - vélocimétrie sanguine (vitesse du sang)
  - débitmètre à ultrasons (vitesse d’un liquide)
  - radar (ondes EM hyperfréquences)
  - mesure de la vitesse des étoiles (décalage vers le rouge des ondes lumineuses des étoiles qui s’éloignent)

1-2-17- Ondes de choc & ondes balistiques

Ceci concerne les objets qui se déplacent plus vite que le son :

$v > c$ (dans l'air : 340 m/s ou 1200 km/h)

- Nombre de **Mach** = v/c

objet	subsonique :	nb de Mach	< 1
“	transsonique :		≈ 1
“	supersonique :		> 1
“	hypersonique :		> 5

• Onde de choc créée par un avion supersonique

Le bruit du moteur se propage moins vite que l’avion.

Les surfaces d’onde forment un cône arrière où l’énergie sonore est concentrée :

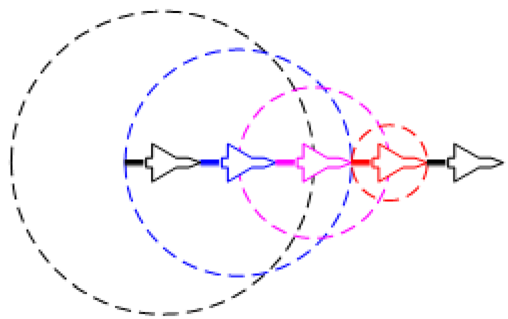


Fig. 15

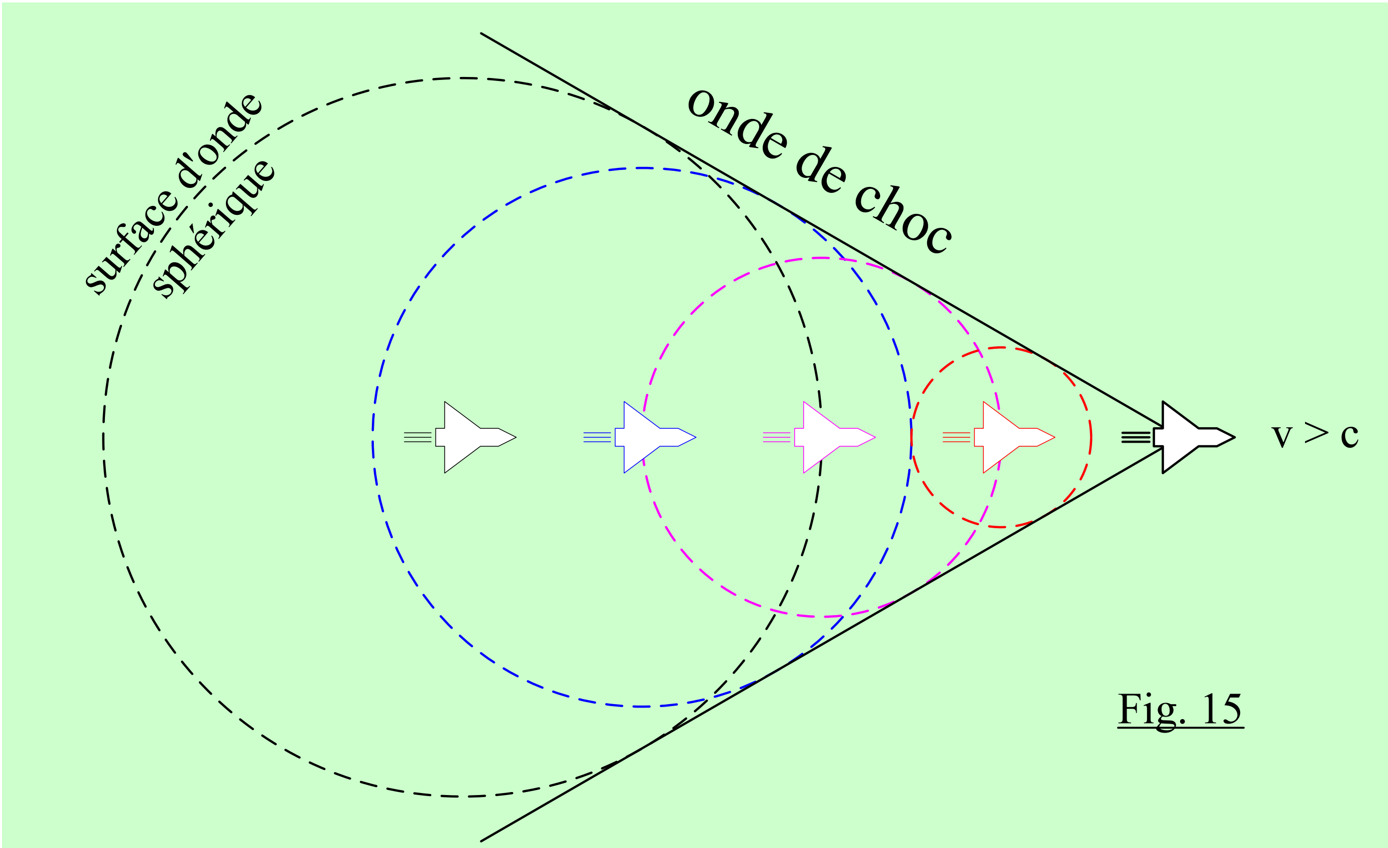
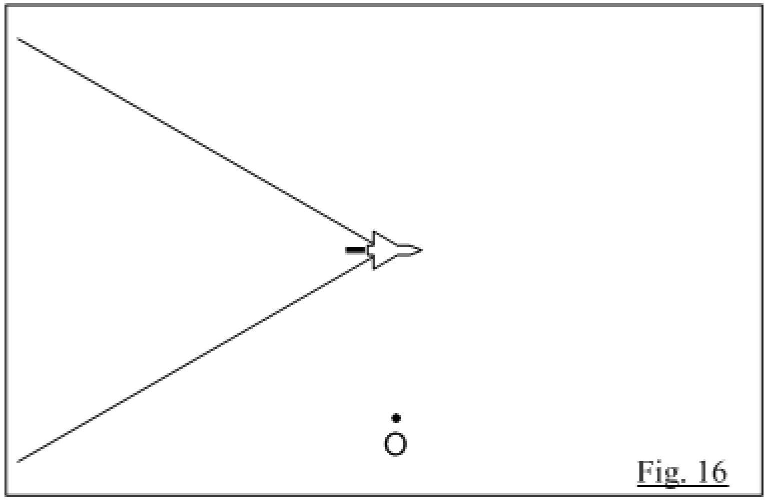
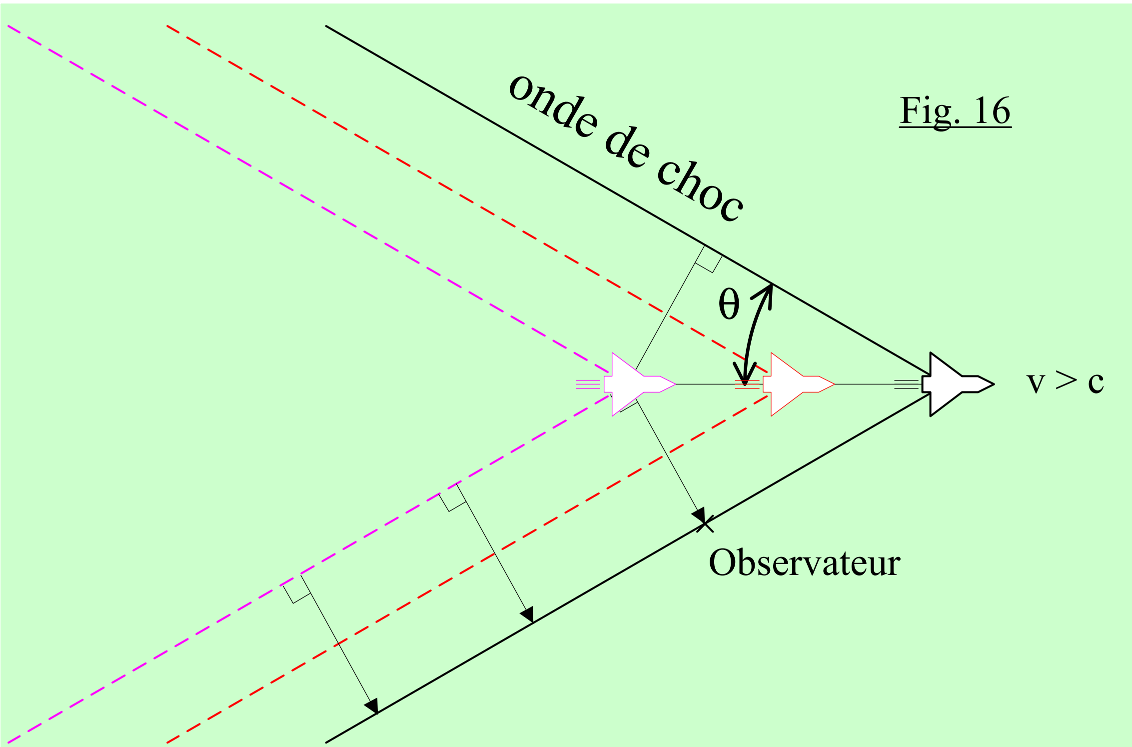


Fig. 15





$$\boxed{\sin\theta = \frac{c}{v}}$$

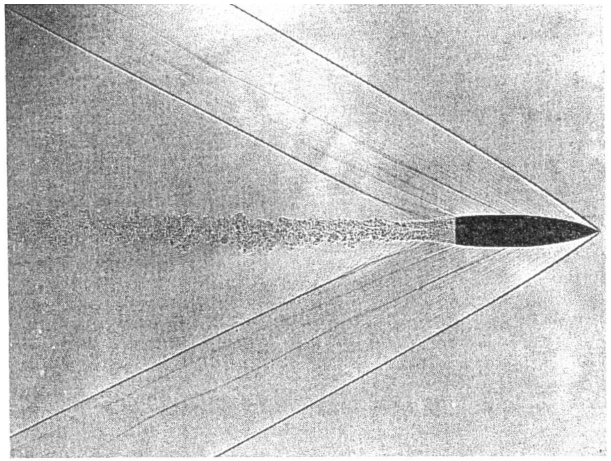
A.N. Mach 2

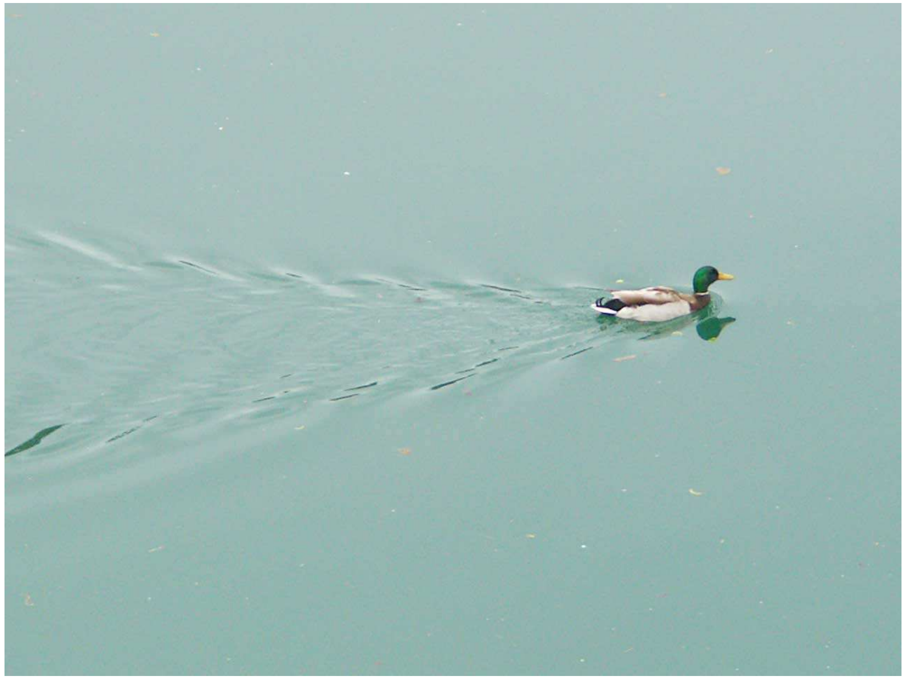
$\sin \theta = 1/2$

$\theta = 30°$

Remarques :

- effet destructif des ondes de choc (dû à leurs énergies)
- passage du mur du son : double bang
- explosion : onde de choc due à l'élévation de la température de l'air
- sifflement d'une balle





1-3- Ondes élastiques dans les solides

Dans les solides (et les fluides très visqueux), les ondes peuvent se propager dans le mode transversal (ondes de cisaillement).

1-3-1- Célérité des ondes longitudinales (ondes L)

$$\boxed{c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}\,\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}}$$

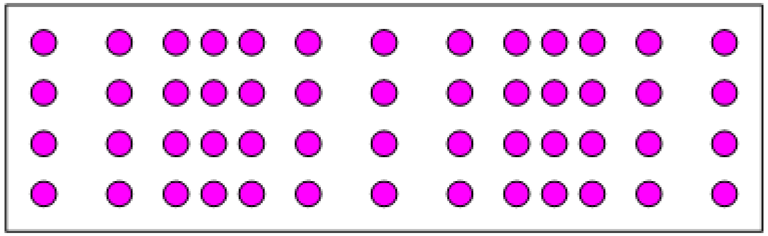


Fig.17

- c_L en m/s
- E : module d'Young (module d'élasticité) en N/m²

  élasticité ↘ E ↗

- μ : coeff. de Poisson (sans unité)
- ρ : masse volumique (kg/m^3)

A.N. acier (1% de carbone)

$E = 2{,}1\cdot10^{11}$ N/m²

$\mu = 0{,}28$

$\rho = 7700$ kg/m^3

d'où : $c_L = 5920$ m/s

1-3-2- Célérité des ondes transversales (ondes T)

$$\boxed{c_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}}$$

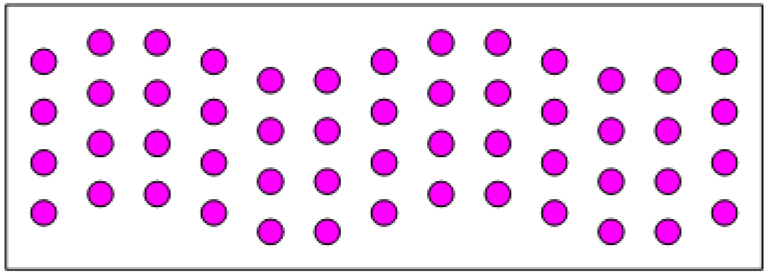


Fig.18

A.N. acier (1% de carbone) $c_T = 3255$ m/s

Remarque : on a toujours $c_T < c_L$

1-3-3- Autres modes de propagation

• Ondes de surface (ondes de Rayleigh)

Propagation à la surface des solides :

$$\mathbf{c_S \approx 0{,}9c_T}$$

A.N. acier (1% de carbone) c_S = 2900 m/s

• Ondes de plaques (ondes de Lamb)

Propagation dans les plaques de faible épaisseur (tôles) :

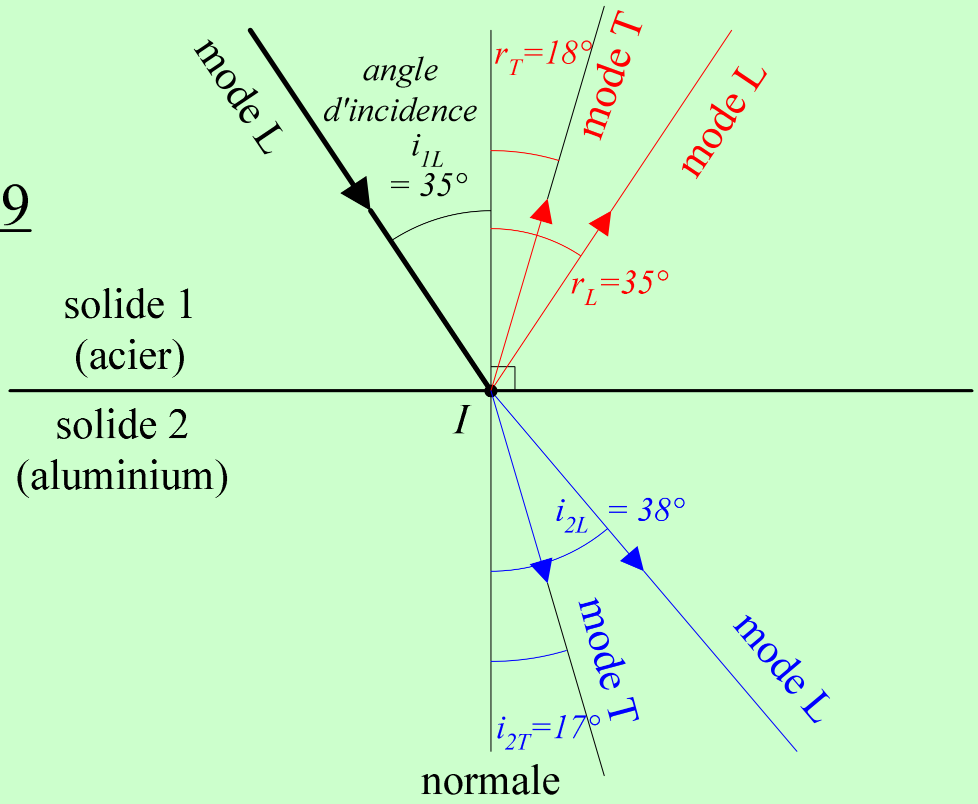
$$c_{Lamb} = f(\lambda)$$

1-3-4- Changement de milieu de propagation

• Lois de Snell-Descartes

Exemple : passage de l'acier dans l'aluminium

Fig. 19



Phénomène de double réflexion et de double réfraction.

Solide 1 (acier) : c_{1L} = 5920 m/s c_{1T} = 3255 m/s

Solide 2 (aluminium) : c_{2L} = 6300 m/s c_{2T} = 3100 m/s

Réfraction :

$$\frac{\sin i_{1L}}{c_{1L}} = \frac{\sin i_{2L}}{c_{2L}} \qquad \text{d'où :} \quad i_{2L} = 38°$$

$$\frac{\sin i_{1L}}{c_{1L}} = \frac{\sin i_{2T}}{c_{2T}} \qquad \text{d'où :} \quad i_{2T} = 17°$$

Réflexion :

$$r_L = i_{1L} = 35°$$

$$\frac{\sin i_{1L}}{c_{1L}} = \frac{\sin r_T}{c_{1T}} \qquad \text{d'où :} \quad r_T = 18°$$

Remarque : les ondes L sont toujours plus déviées que les ondes T (car $c_T < c_L$)

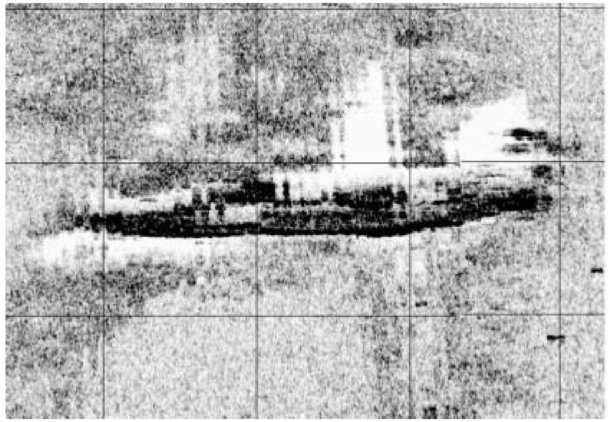
1-4- Utilisation pratique des ultrasons

a- Echo (réflexion)

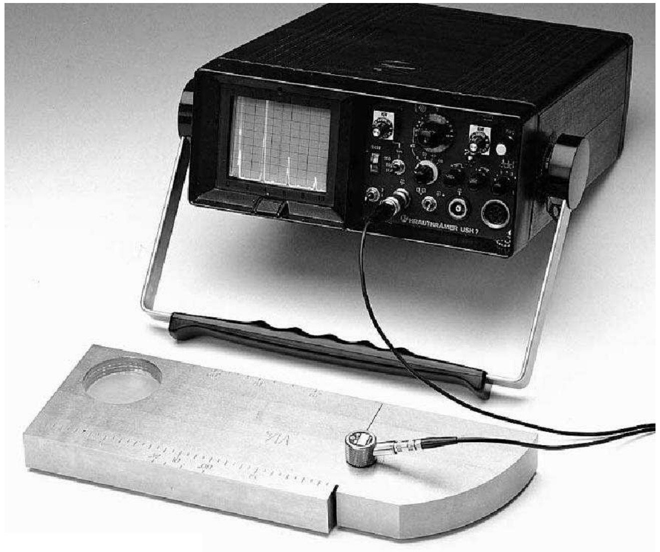
• échographie médicale

• SONAR

• mesure d'épaisseur / distance / niveau



• contrôle non destructif (contrôle de soudure, défaut interne ...)



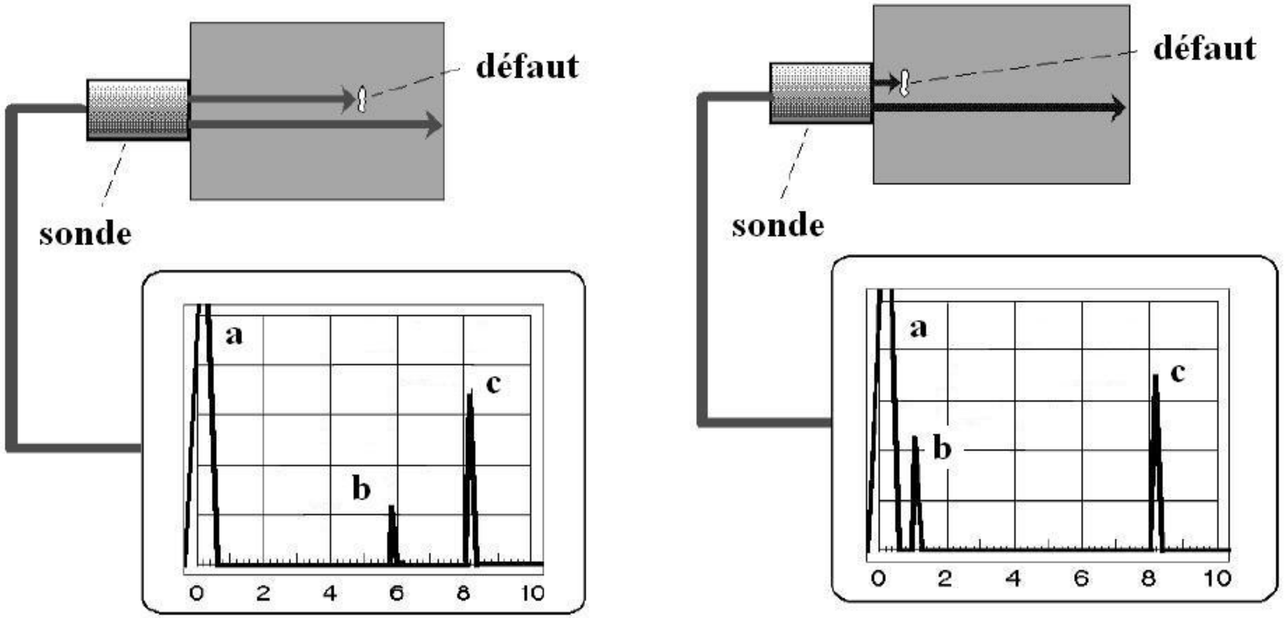


Fig. 20 CND par ultrasons d'une pièce en acier

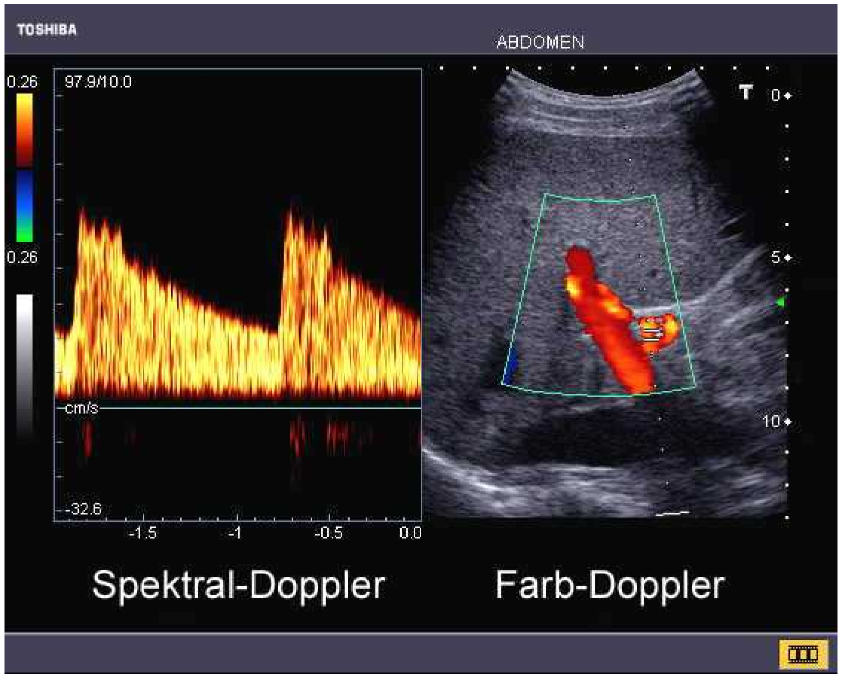
a : écho d'émission
b : écho de défaut
c : écho de fond

b- Energie

- soudage (des thermoplastiques)
- nettoyage (bac à ultrasons)
- traitement de certains cancers

c- Effet Doppler

- débitmétrie, vélocimétrie
- échodoppler (cartographie dynamique du système vasculaire)



d- Onde acoustique

- microscope (avec des lentilles acoustiques)