Diapos réalisées par Jérôme Kasparian

Ondes

Vibrations, musique, son

Kane chapitres 9, 21, 22 ; Hecht chapitre 12, 13

Onde

Exercice

On peut affirmer que

A. L’eau se déplace horizontalement

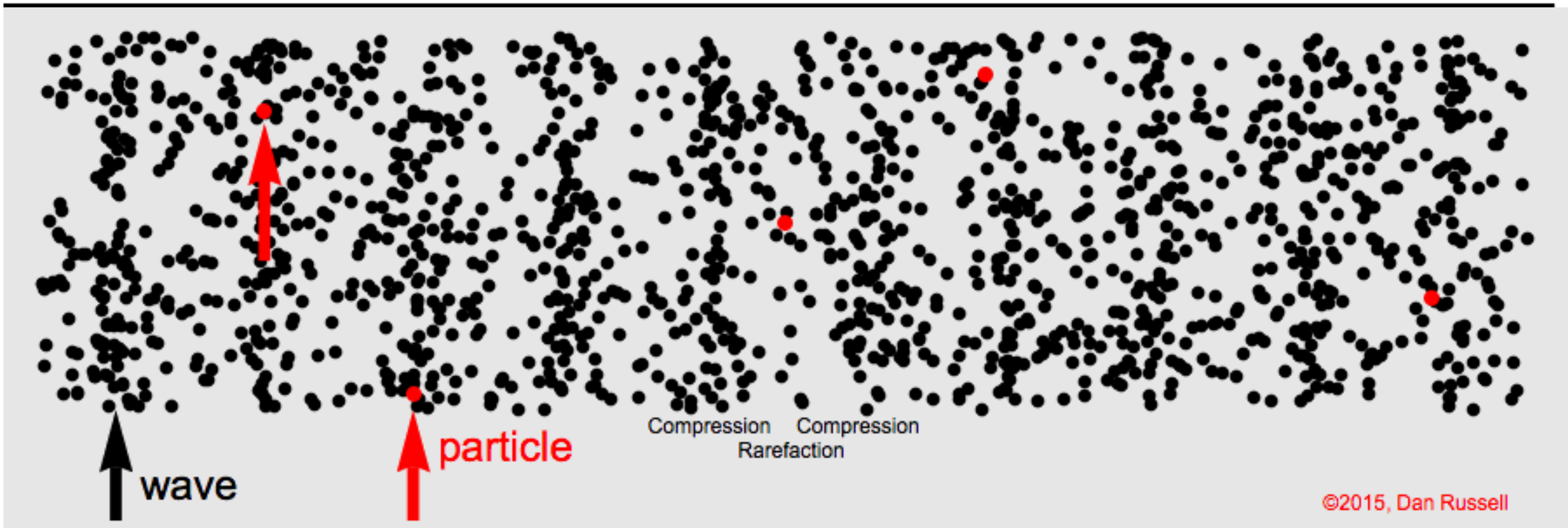
B. L’eau se déplace verticalement

C. La surface de l’eau se déforme

D. La déformation se déplace

Onde

Onde : Perturbation (= déformation) qui se propage
Transport d'énergie
Transport de quantité de mouvement
Pas de transport de matière : déformation du milieu mais les atomes restent près de leur position d'équilibre



https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves/wavemotion.html

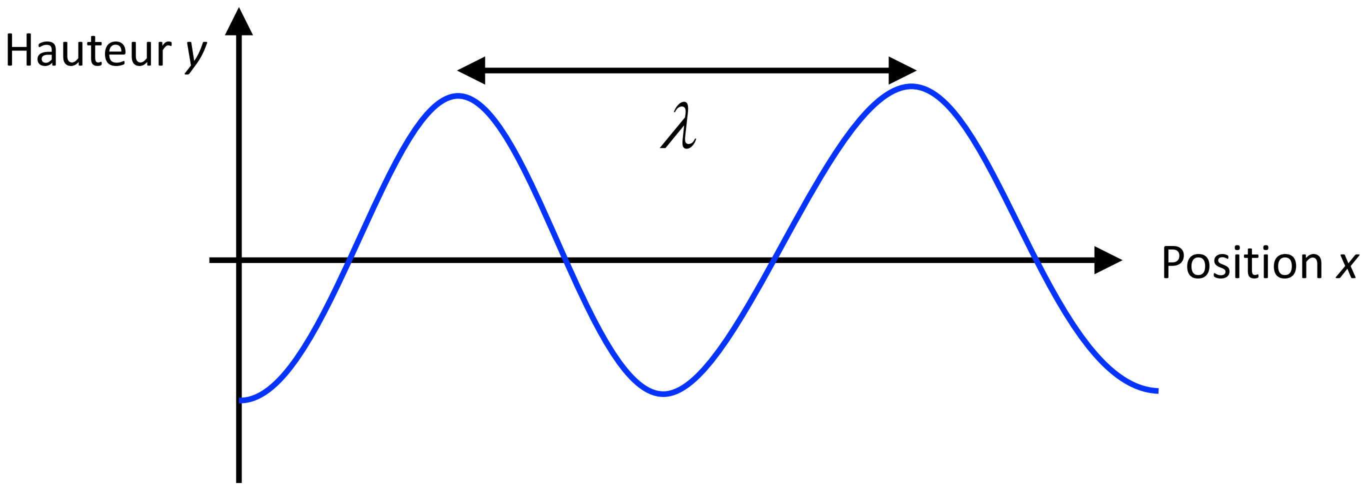
Longueur d'onde

On s'intéresse à l'image de la mer à un instant *t*

Longueur d'onde λ : distance de répétition

Nombre d'onde : $k = 2\pi / \lambda$

Mouvement : $y(x) = y_m \sin(k x + \phi)$



Fréquence, période

On s'intéresse au mouvement de la barque
(= en un point de la surface)
en fonction du temps t

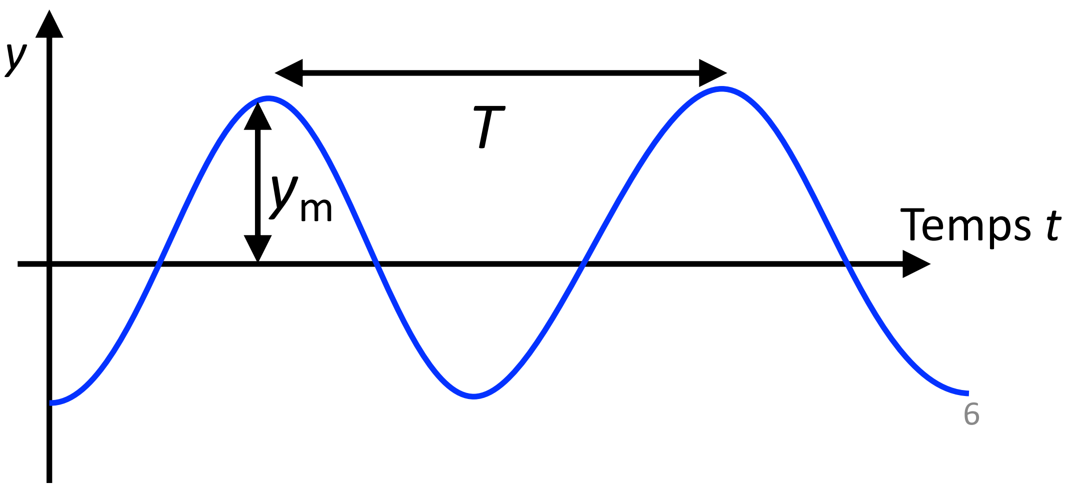
Cf mouvement harmonique, Ch. 2

Période T

Fréquence f

Fréquence angulaire $\omega = 2\pi f$

Mouvement :
$y(t) = y_m \sin(\omega t + \phi)$



Vitesse de l'onde

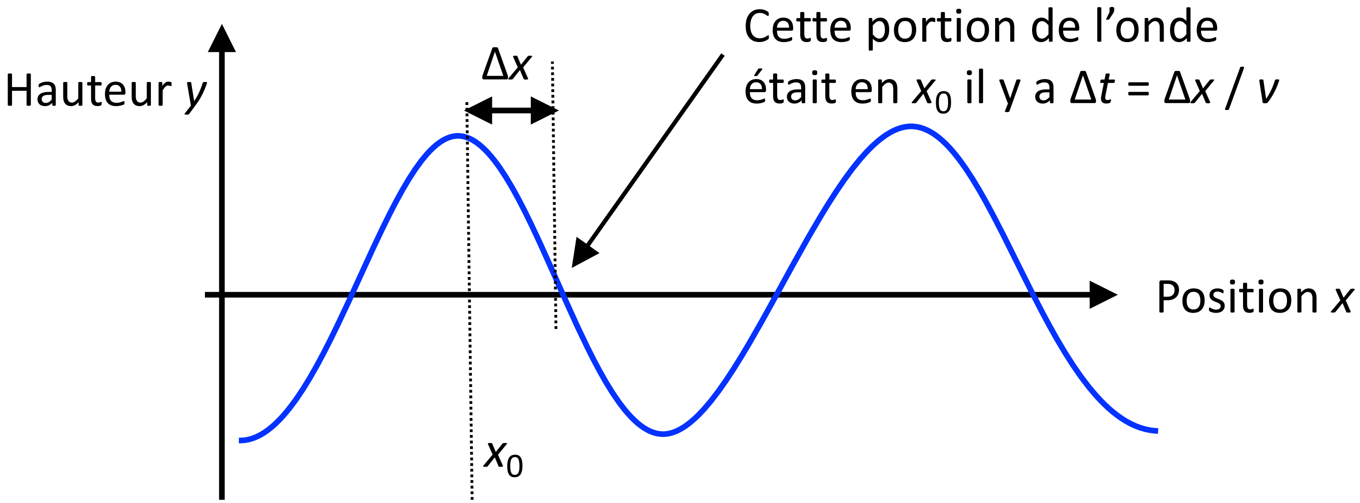
L'onde se propage d'une distance λ pendant un temps T, sa vitesse est donc :

$$v = \lambda / T = \lambda f = \omega / k$$

Du fait de la propagation, avancer de Δx ou *reculer* de $\Delta t = \Delta x / v$ est équivalent. On peut donc écrire $y(x,t) = y_m \sin(k x - \omega t + \phi)$

f dépend de l'excitation

v dépend du milieu de propagation



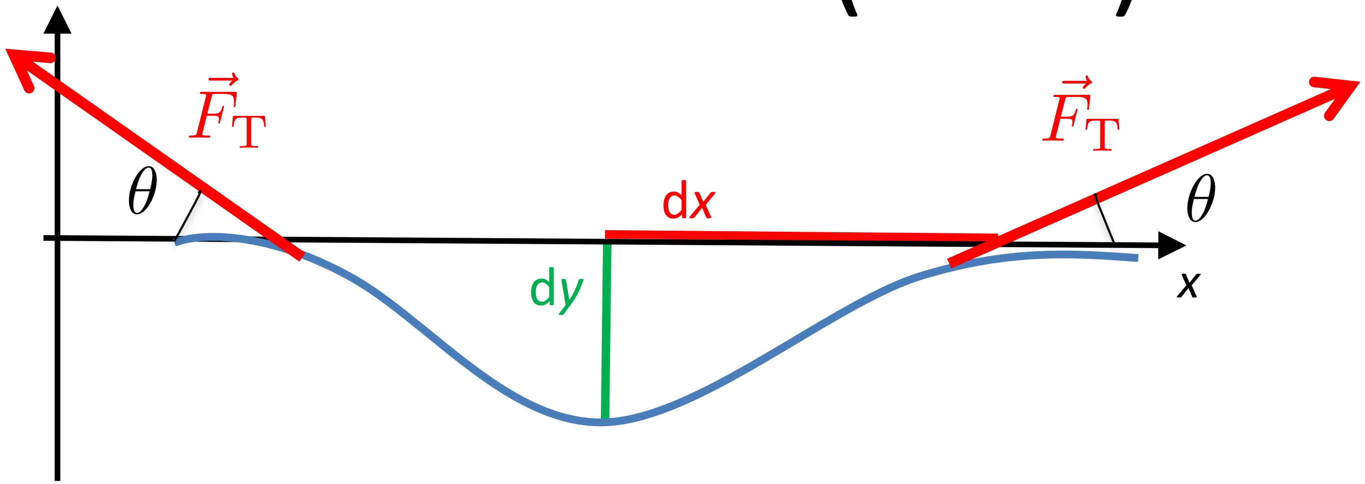
Onde transverse

Polarisation

Corde tendue : onde transverse

On considère une corde tendue (tension F_T), de masse linéique (=par unité de longueur) μ [kg/m]

Corde tendue (suite)



2ème loi de Newton (sur l'axe *y*) pour un petit élément

$$m\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2} = 2F_\mathrm{T}\sin(\theta)$$

$$\mu \times 2\mathrm{d}x\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2} = 2F_\mathrm{T}\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2} = \frac{F_\mathrm{T}}{\mu}\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}x^2}$$

Équation d'onde ou équation de d'Alembert :
relie les évolutions temporelle et spatiale de *y*

Équation d'onde

Forme générique : $$\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} = v^2 \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2}$$

Solution (cf. exercice d'approfondissement) :

$y(x,t) = y_m \sin(k\,x - \omega\,t + \phi)$, avec $v = \omega / k$

ω détermine k et inversement : relation de dispersion

Pour la corde tendue : $$\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} = \frac{F_\mathrm{T}}{\mu} \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2} \Longrightarrow \boxed{v = \sqrt{\frac{F_\mathrm{T}}{\mu}}}$$

Donc $\omega = k\sqrt{\frac{F_\mathrm{T}}{\mu}}$

Exercice

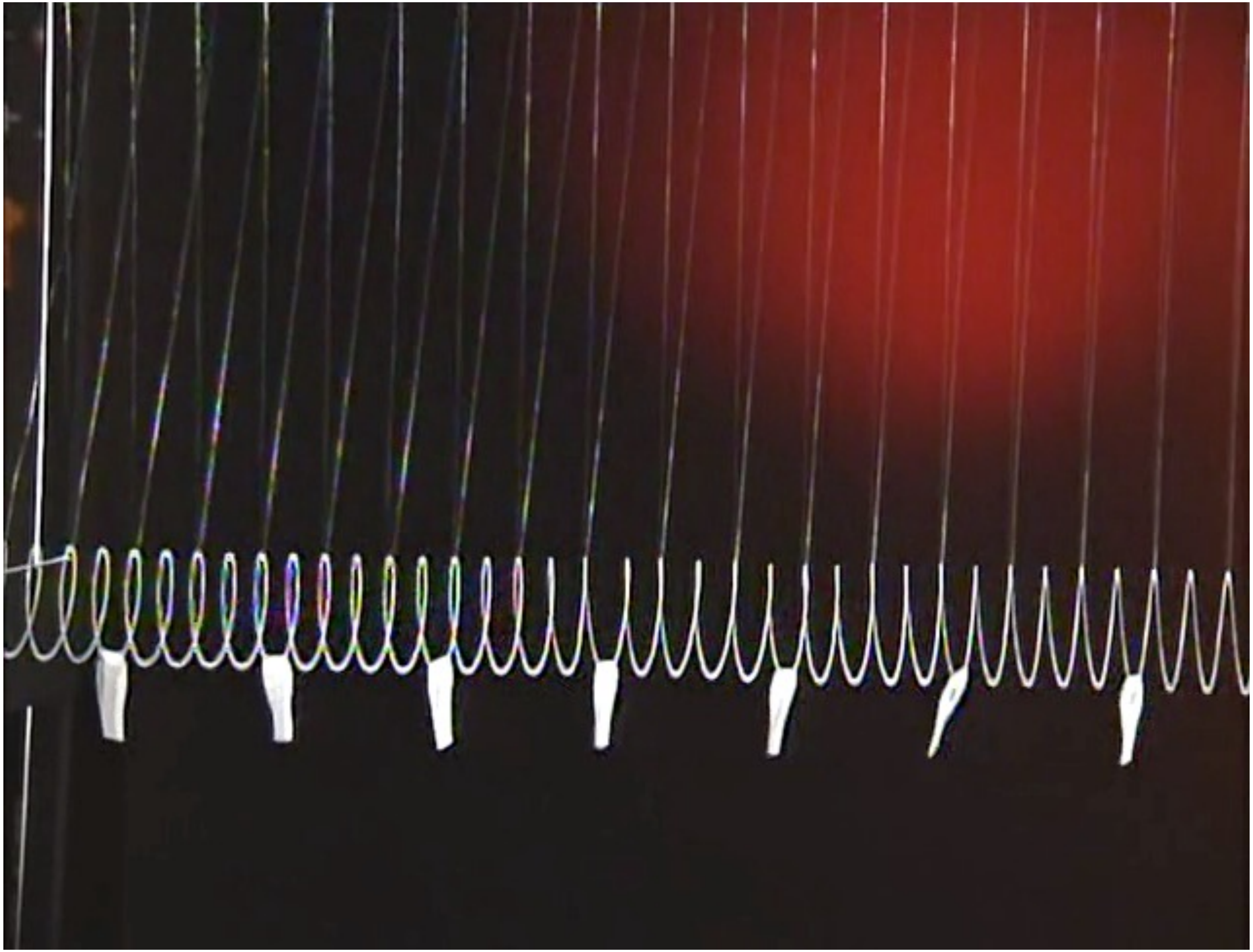
Sur une corde de guitare plus tendue :

A. L'onde se déplace plus rapidement
B. L'onde se déplace plus lentement

Sur une corde de guitare plus lourde

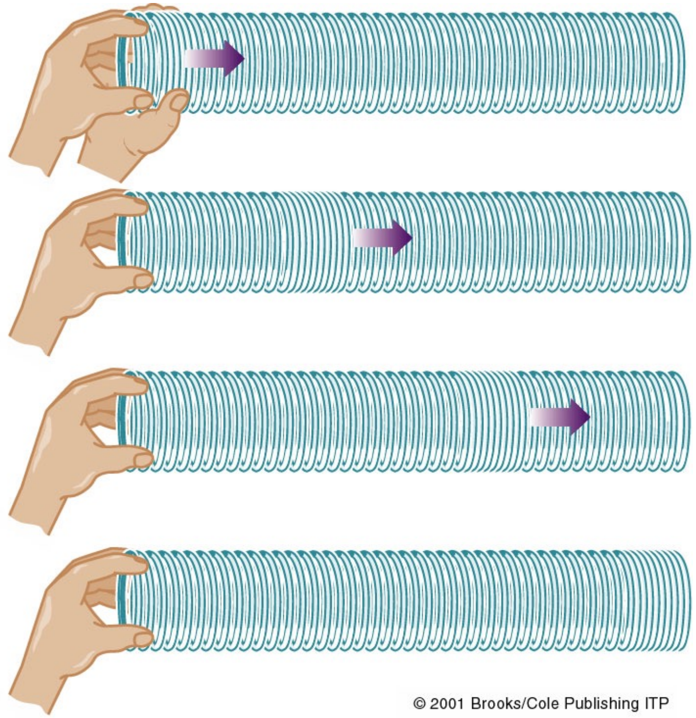
C. L'onde se déplace plus rapidement
D. L'onde se déplace plus lentement

Onde longitudinale



Onde de pression : longitudinale

On peut montrer que, comme pour l'onde transverse, la vitesse d'une onde longitudinale est la racine carrée du rapport rappel / inertie :



$$\boxed{v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}}$$

K : module de compressibilité $V\,\mathrm{d}P / \mathrm{d}V$

$K_{air} \sim 10^5$ N/m^2, $K_{eau} \sim 2{,}2 \times 10^9$ N/m^2, $K_{acier} \sim 1.6 \times 10^{11}$ N/m^2

$v_{eau} \sim 1500$ m/s, $v_{air} \sim 340$ m/s (niveau de la mer)

La tranche se déplace, mais aussi se déforme : compression locale.

Cf. exercice d'approfondissement

Intensité sonore

Onde sonore : oscillation de pression, d'amplitude ΔP_{max}, autour de la pression atmosphérique.

On définit l'intensité sonore : $\boxed{I = \frac{\Delta P_{\max}^2}{2\rho\ v} = \frac{\Delta P_{\text{eff}}^2}{\rho\ v}}$

ΔP_{eff} est la pression « constante » qui produirait la même intensité que l'onde d'amplitude ΔP_{max} : $\Delta P_{eff} = \Delta P_{max} / \sqrt{2}$

Seul d'audibilité : $\Delta P_{eff,seuil} = 2 \times 10^{-5}$ Pa

Pour $\rho = 1.2$ kg/m^3, $v = 343$ m/s : $I_0 = \frac{\Delta P_{\text{eff,seuil}}^2}{\rho\ v} \approx 10^{-12} \mathrm{W/m^2}$

Seuil de douleur ~1 W/m^2

Exercice

Combien vaut $\Delta P_{\mathrm{eff,\ douleur}}$

A. 2 Pa

B. 20 Pa

C. 2 x 10^7 Pa

D. 2 x 10^{12} Pa

Indice : $I_{\mathrm{douleur}}/I_0 = \Delta P^2_{\mathrm{eff,\ douleur}} / \Delta P^2_{\mathrm{eff,\ seuil}}$ (pourquoi ?)

Sensibilité de l'oreille humaine

L'oreille est sensible à une large plage d'intensités : 12 ordres de grandeur.

De plus, la sensation subjective n'est pas proportionnelle à l'intensité.

On définit le niveau d'intensité du son (ou niveau sonore) en dB (décibel) : $\beta = 10 \log_{10}(I / I_0)$

Seuil d'audibilité : $\beta = 10 \log_{10}(1) = 0$ dB

Intensité double = + 3 dB

Exercice

Calculer β au seuil de douleur

A. 1 dB

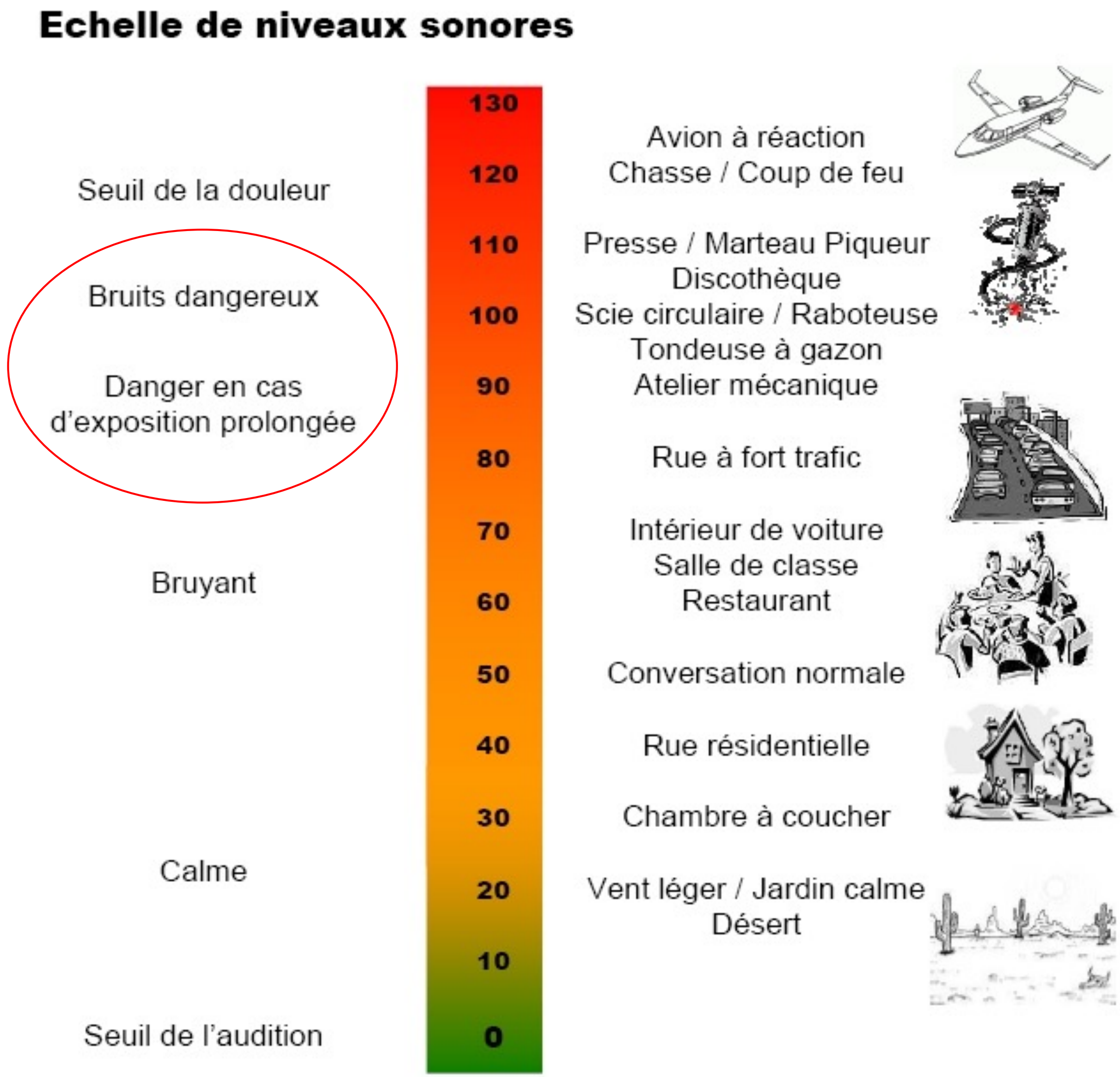
B. 3 dB

C. 120 dB

D. 10^{12} dB

Indice : $I = 1\ W/m^2$

Échelle de sensibilité



Exercice

Dans un auditoire, le niveau sonore est de 60 dB. Un étudiant se met à parler à son voisin, avec un niveau de 50 dB.

Le niveau sonore total sera

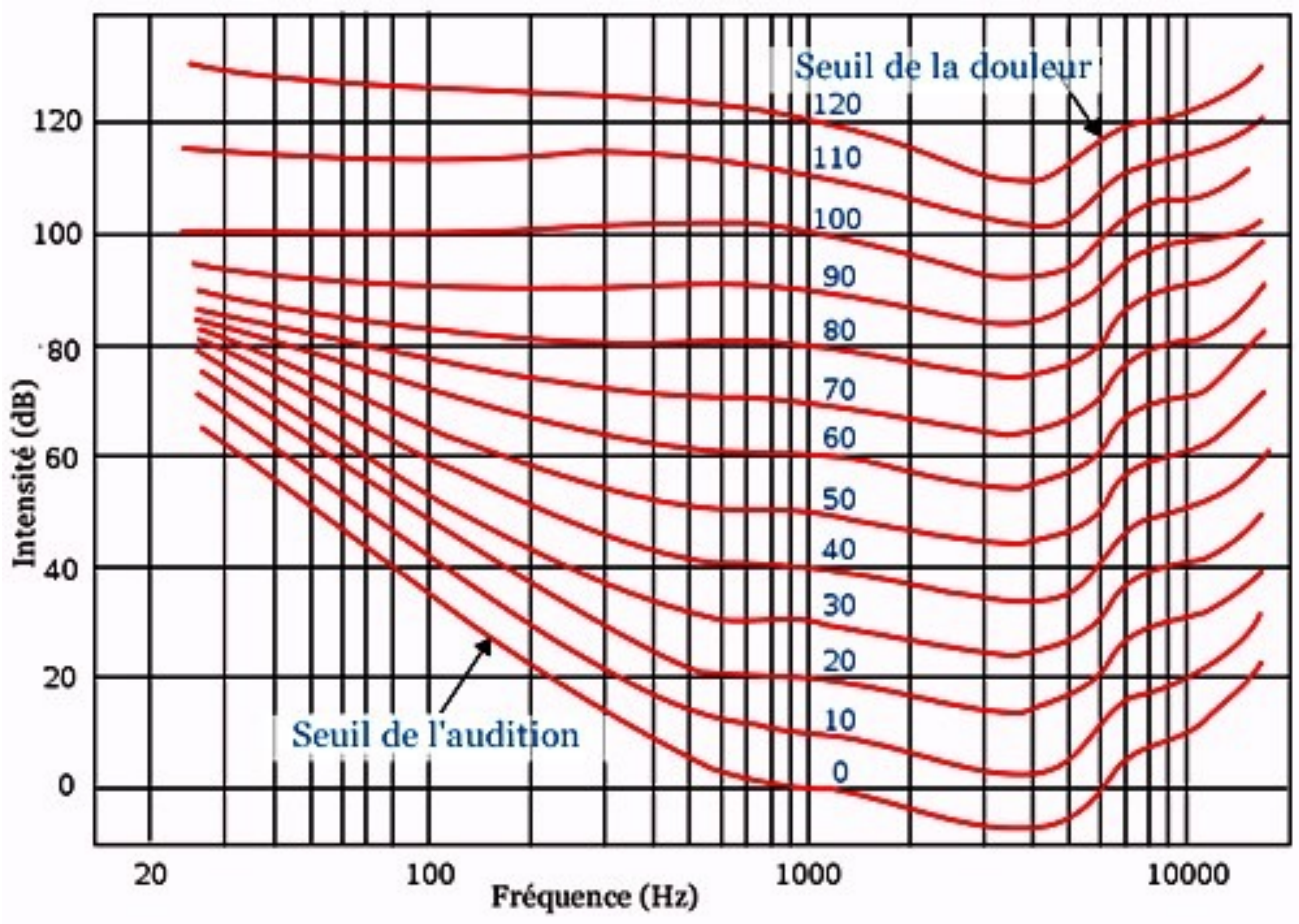
A. 50 dB
B. 60 dB
C. 60,4 dB
D. 70 dB
E. 110 dB

Indice : on additionne les *intensités*

Sensibilité spectrale

L’oreille est sensible aux fréquences entre 20 et 20’000 Hz.

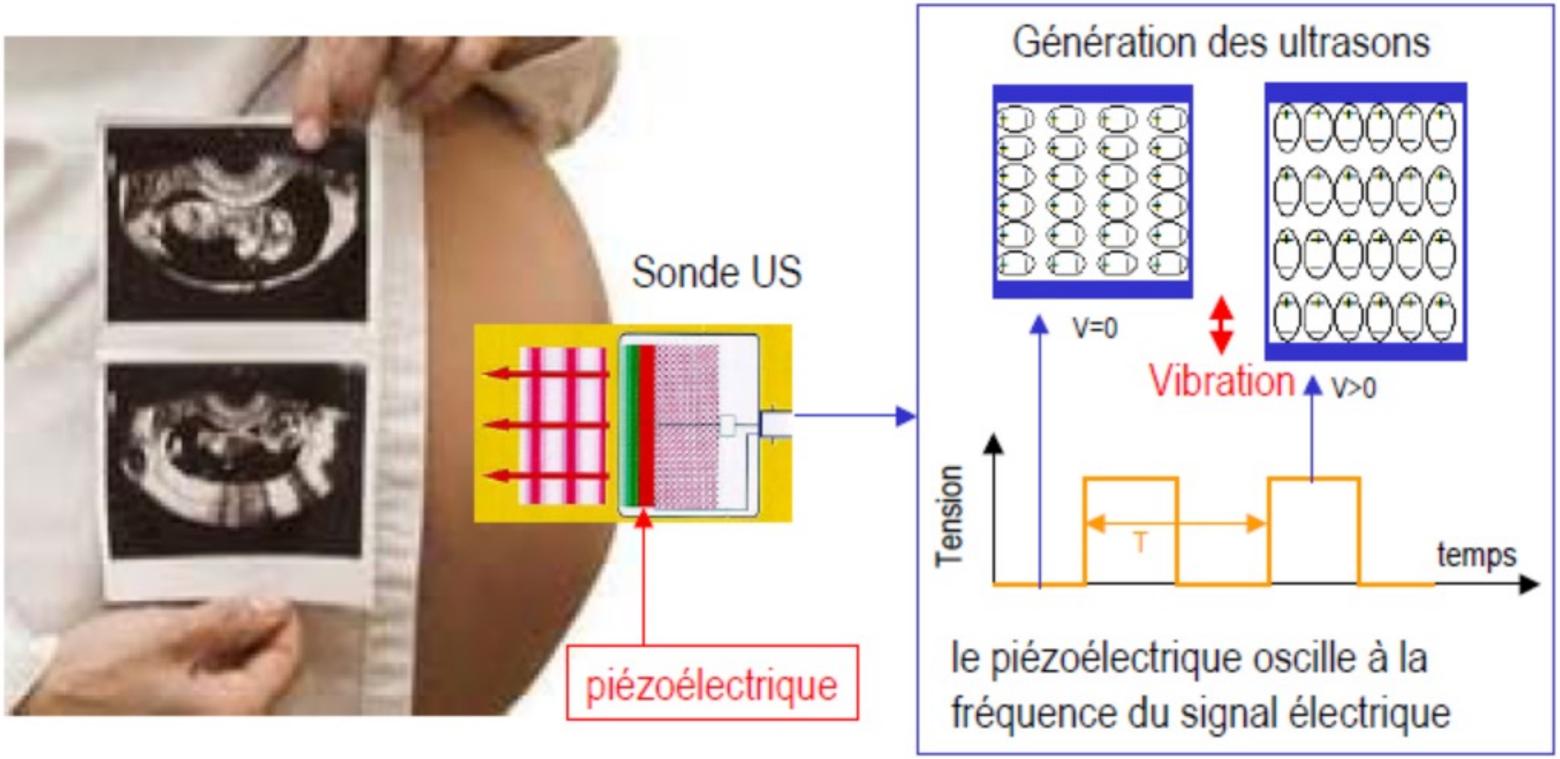
La sensibilité dépend de la fréquence.



Réflexion d'une onde

Échographie

L'échographie utilise la réflexion des ondes sonores de haute fréquence (ultrasons, générés par un cristal piézoélectrique) aux interfaces entre organes, pour construire une image. Peu invasive, mais résolution limitée.



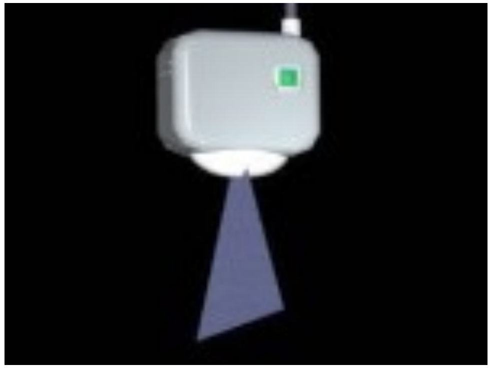
cours Prof. Jean-Paul Vallée

Échographie

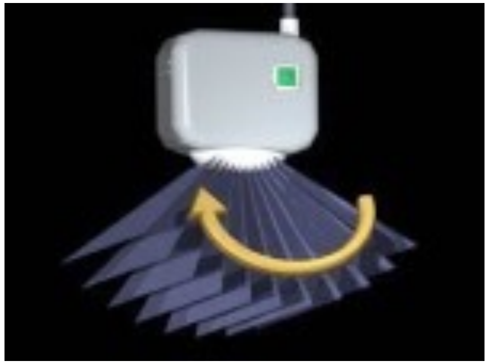
Coefficients de réflexion au passage d’un milieu à un autre

Rein – graisse	0,6%	Muscle – graisse	1,1 %
Foie – eau	3,4 %	Muscle – os	49%
Foie – air	99,%		

Balayage 2D

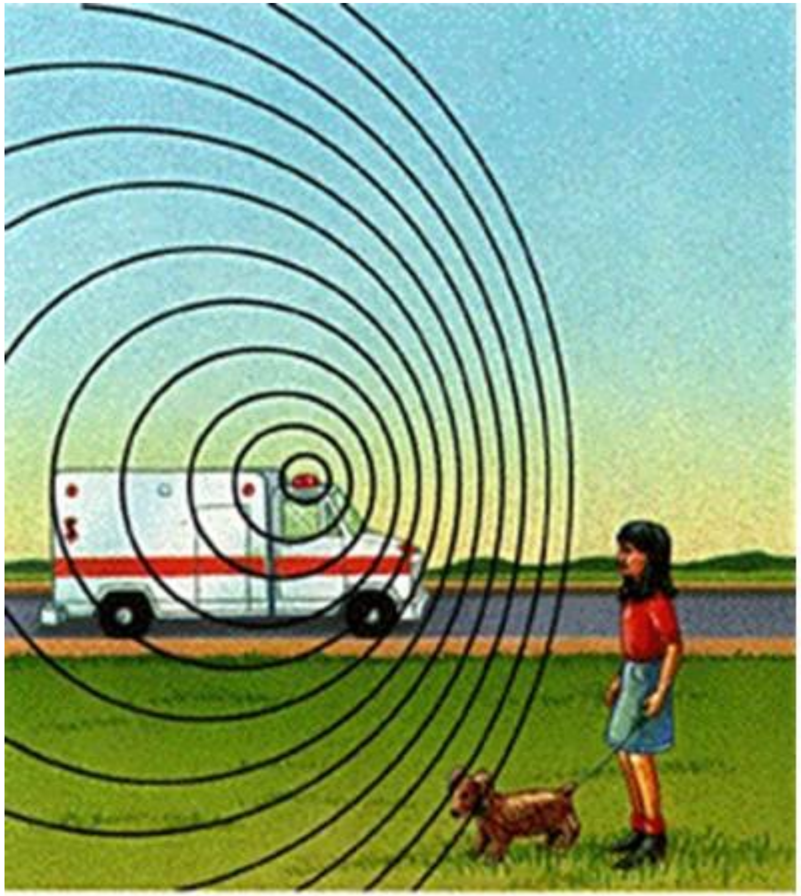


Balayage 3D

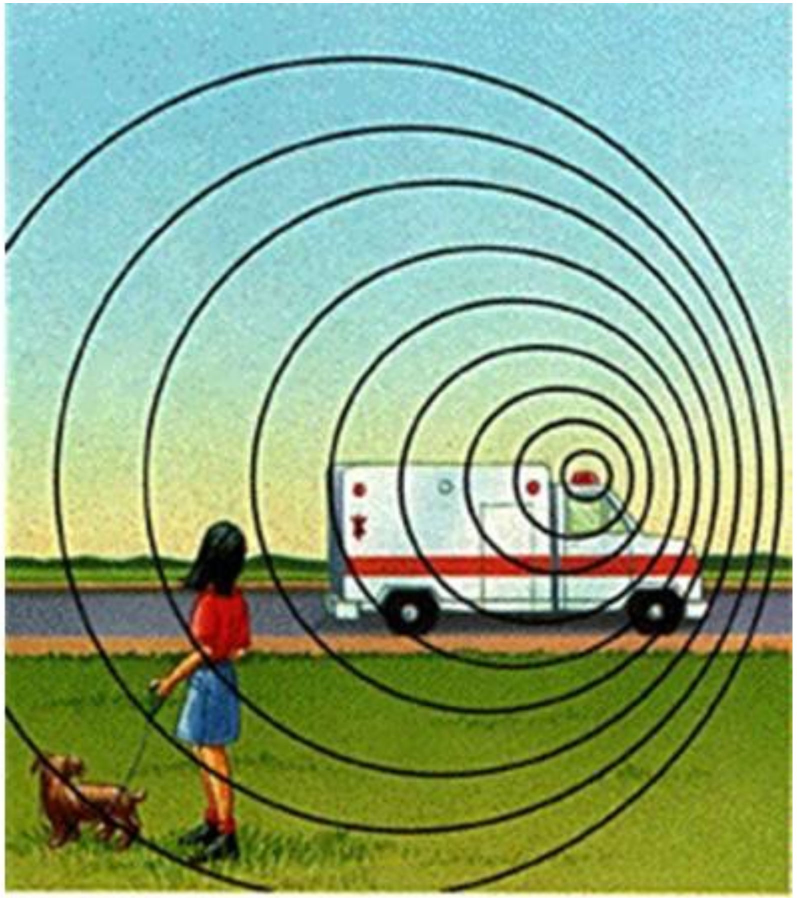


Effet Doppler

Effet Doppler



Les ondes sont émises de plus en plus proches : la longueur d'onde semble plus courte



Les ondes sont émises de plus en plus loin : la longueur d'onde semble plus longue

Effet Doppler

v_s

v_o

On considère

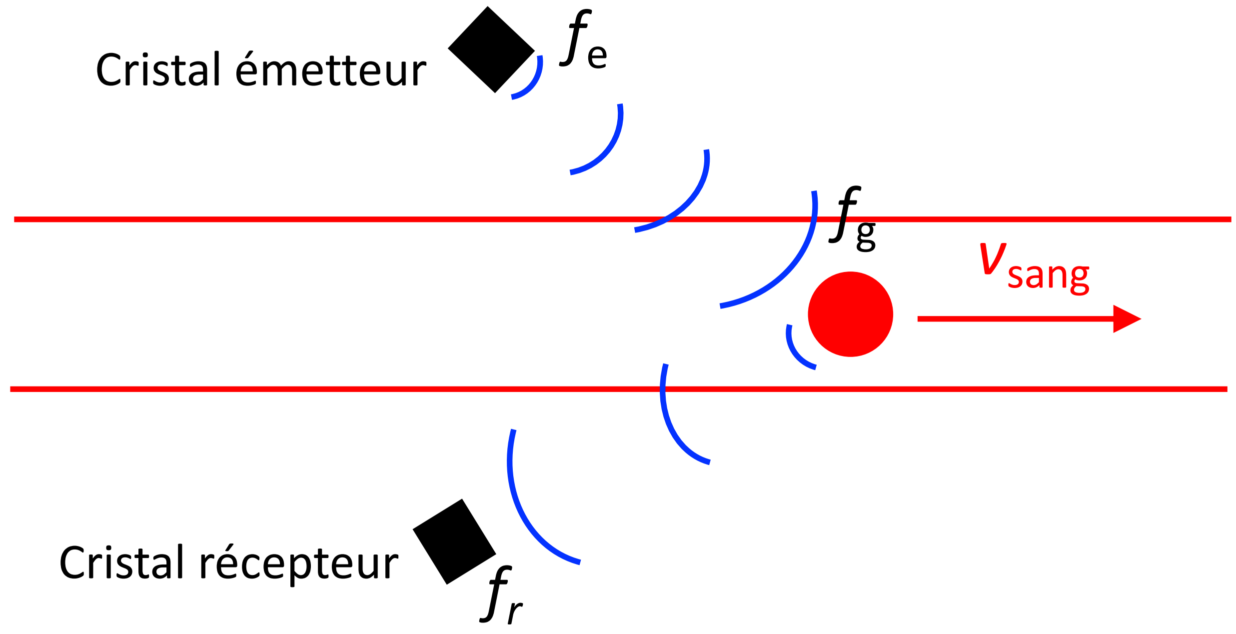
- f_s fréquence de l'onde
- v vitesse de propagation de l'onde
- v_o vitesse à laquelle l'observateur s'éloigne
- v_s vitesse à laquelle la source s'éloigne
  - $v_s > 0$ si la source s'éloigne de l'observateur, $v_s < 0$ si elle se rapproche
  - $v_o > 0$ si l'observateur s'éloigne de la source, $v_o < 0$ s'il se rapproche

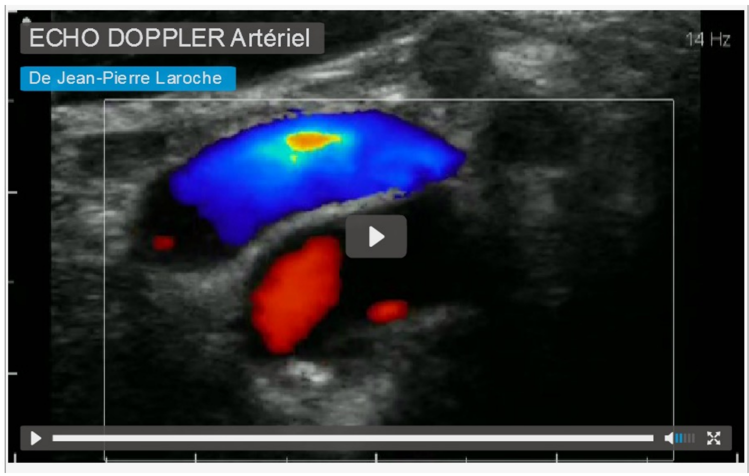
La fréquence f_o perçue par l'observateur est

$$\boxed{f_o = f_s \frac{v - v_o}{v + v_s}}$$

Cf. exercice d'approfondissement

Exemple : Échographie Doppler à ultrasons





Le globule se déplace à la vitesse du sang.
Il s'éloigne de l'émetteur donc $f_g < f_e$.
Il s'éloigne du récepteur donc $f_r < f_g$.
La différence de fréquence donne la vitesse du sang.

Application : échographie cardiaque

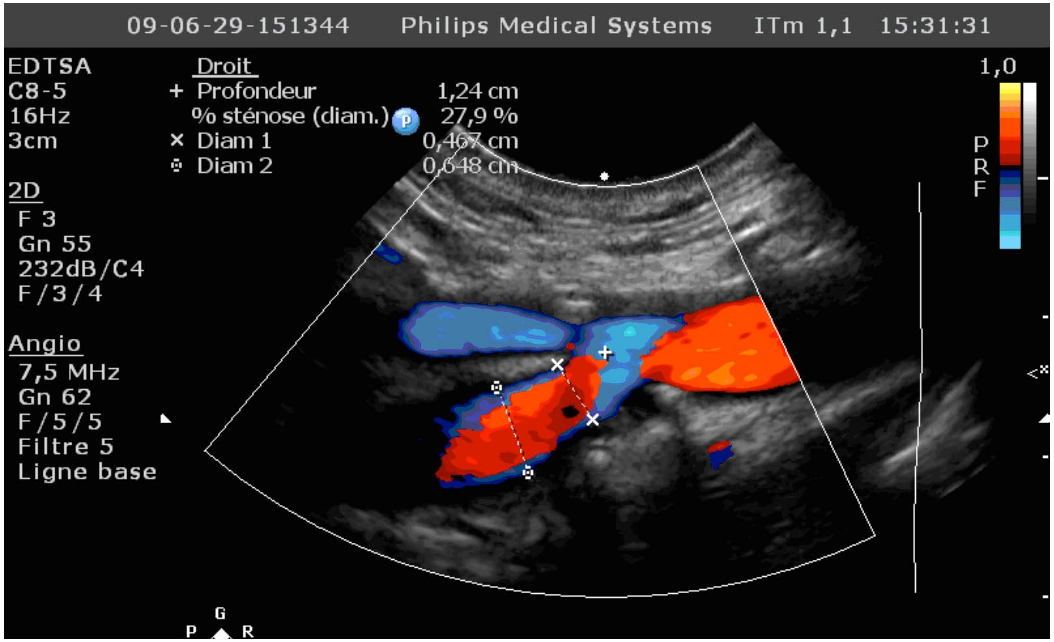
Mesure de pression compliquée : une seule mesure au niveau de l'oreillette droite fournit une pression de référence P_1.

Effet Doppler : mesure facile de la vitesse d'écoulement du sang en tout point par échographie cardiaque.

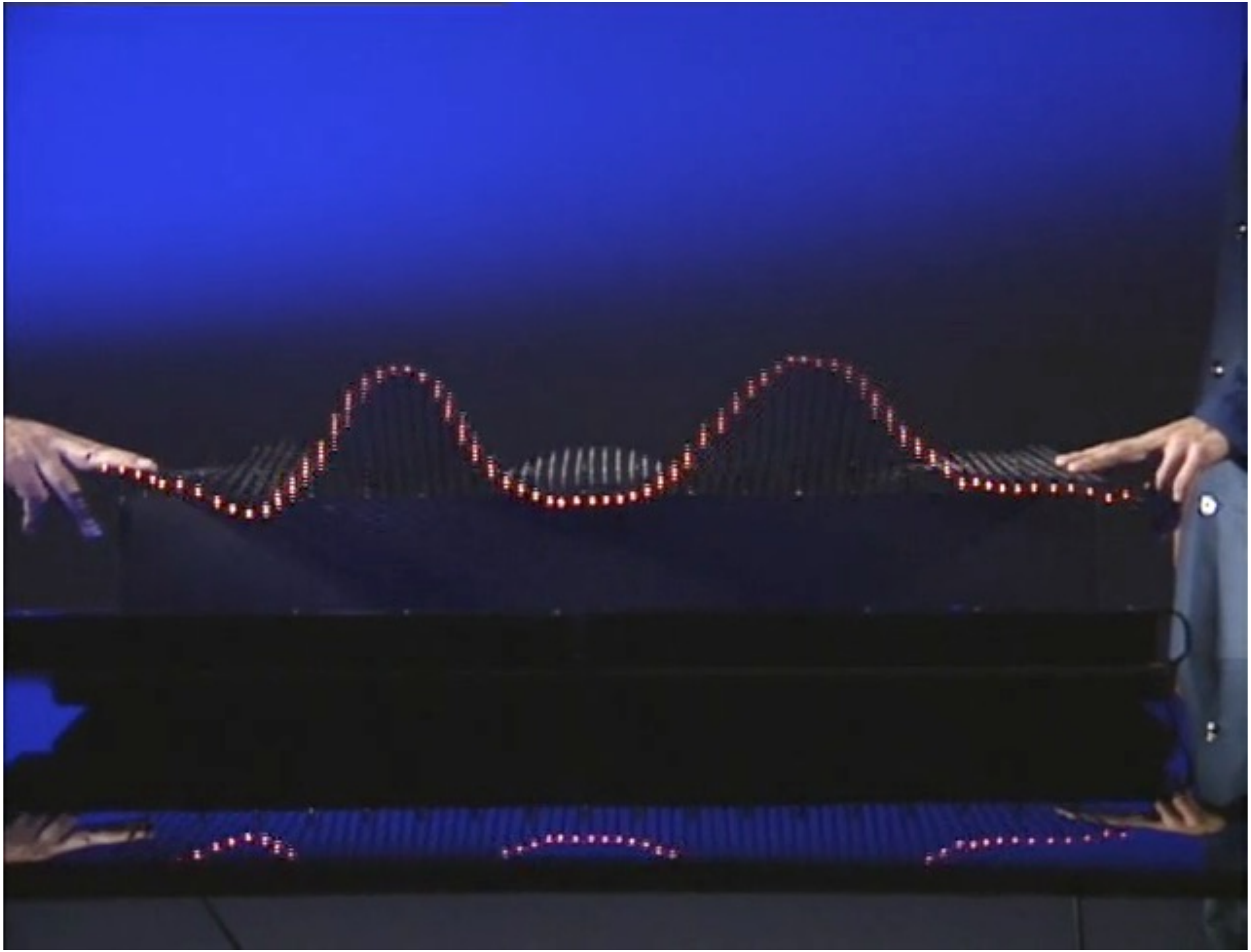
On déduit ensuite la pression en tout point (par exemple, de part et d'autre de la valve)

grâce à l'équation de Bernoulli.

$$P_2 - P_1 = -\frac{1}{2}\rho\left(v_2^2 - v_1^2\right)$$



Superposition d'ondes



Superposition d'ondes

Plusieurs ondes de même type

- Se propagent indépendamment
- S'additionnent (en valeur relative)
  - même signe : se renforcent
  - signes opposés : s'annulent