Physique Avancée IV Semestre de printemps 2025

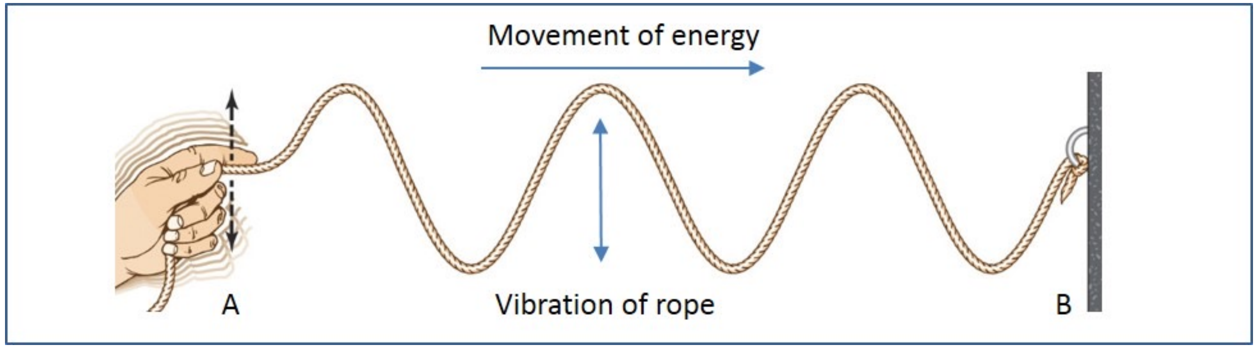
Semaine 3

6 et 7 mars 2025

Christian Doppler
(1803-1853)

Série 3

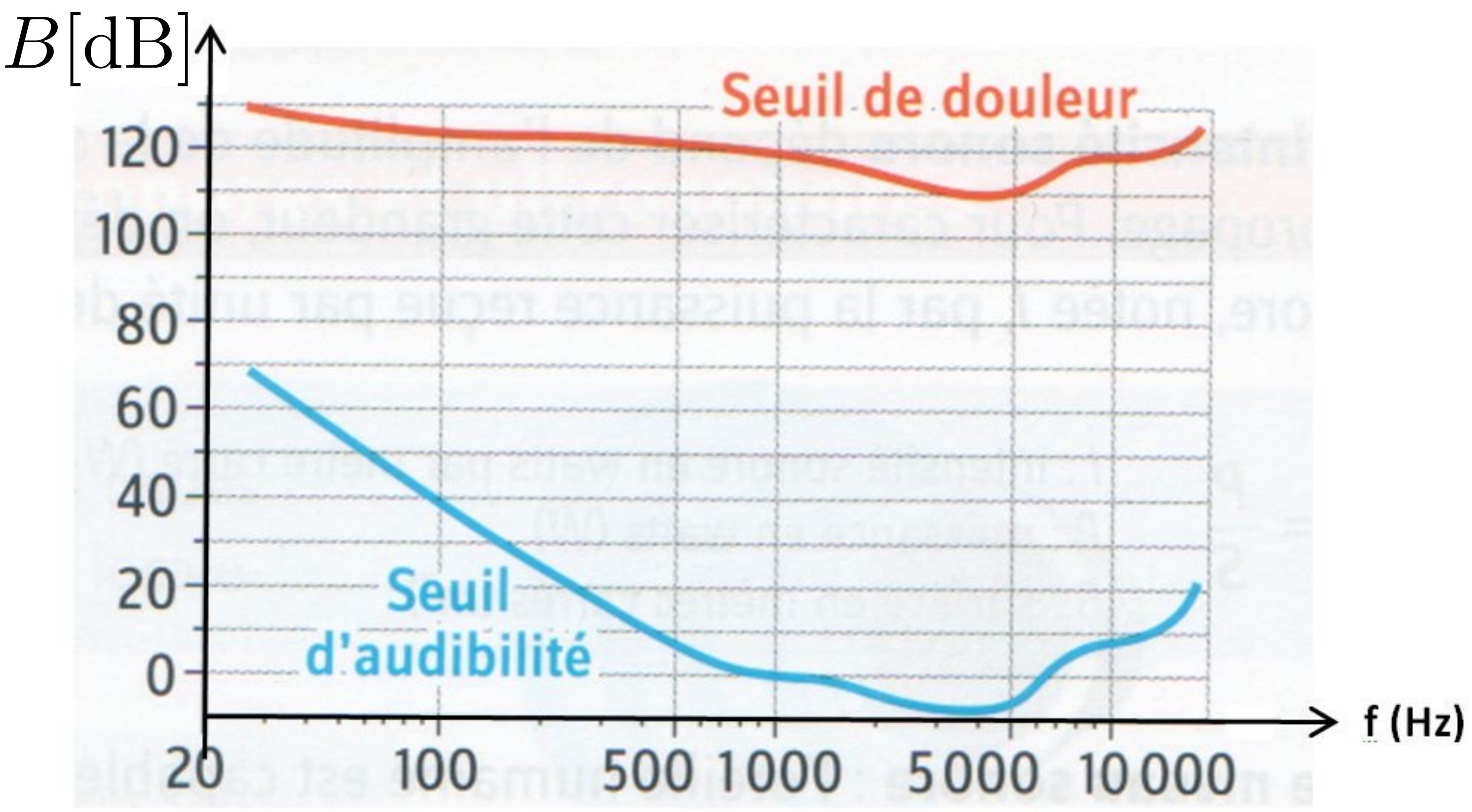
1.2.1.1 Densité d'énergie d'une onde

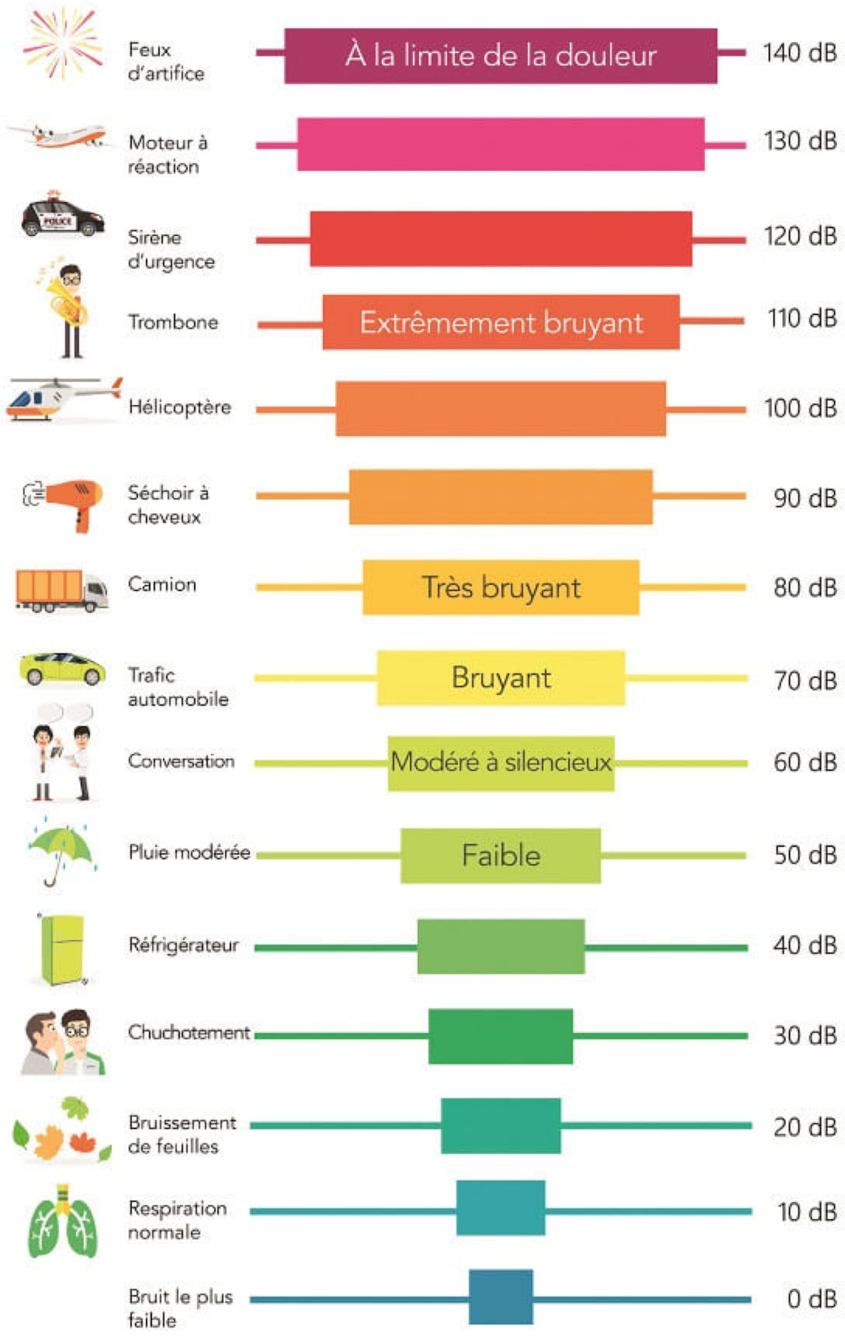


$$\epsilon = \frac{1}{2}\mu u^2 \left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2}\mu \left(\frac{\partial \xi}{\partial t}\right)^2$$

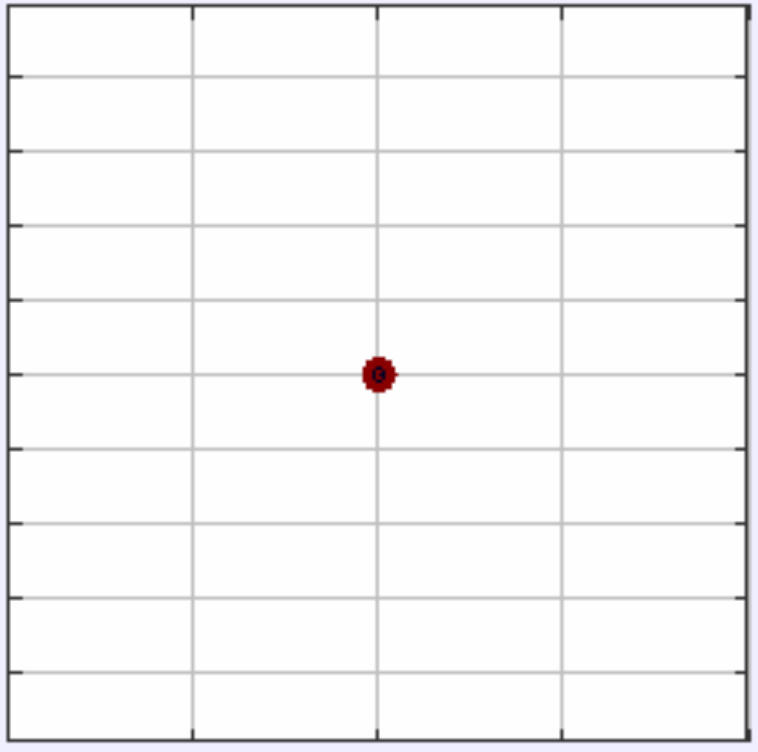
1.2.1.2 Intensité d'une onde

$$\overline{I} = \frac{1}{2}\rho u \omega^2 \xi_0^2 \qquad B = 10\log_{10}\frac{\overline{I}}{\overline{I}_0}[\mathrm{dB}]$$

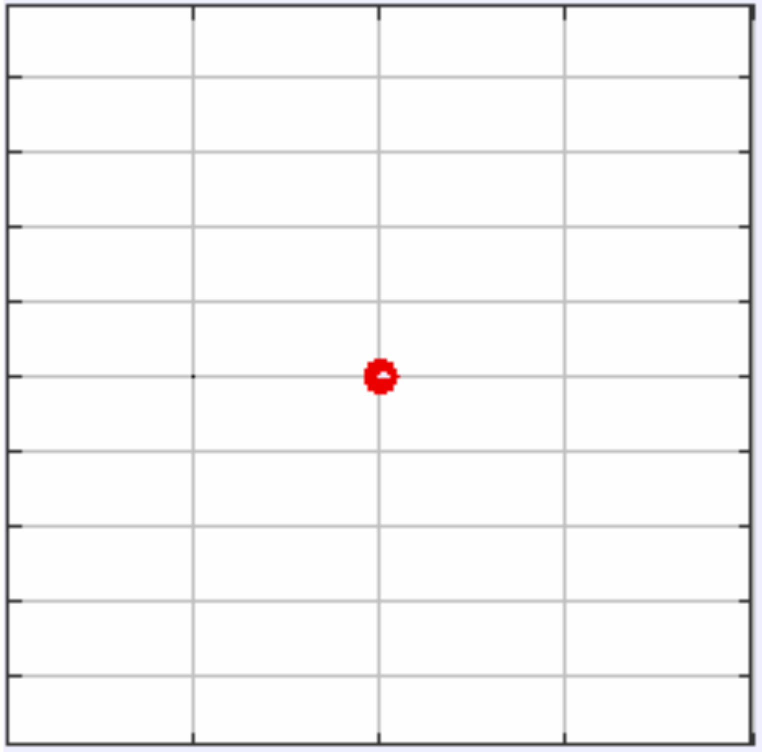




1.2.2 L'effet Doppler

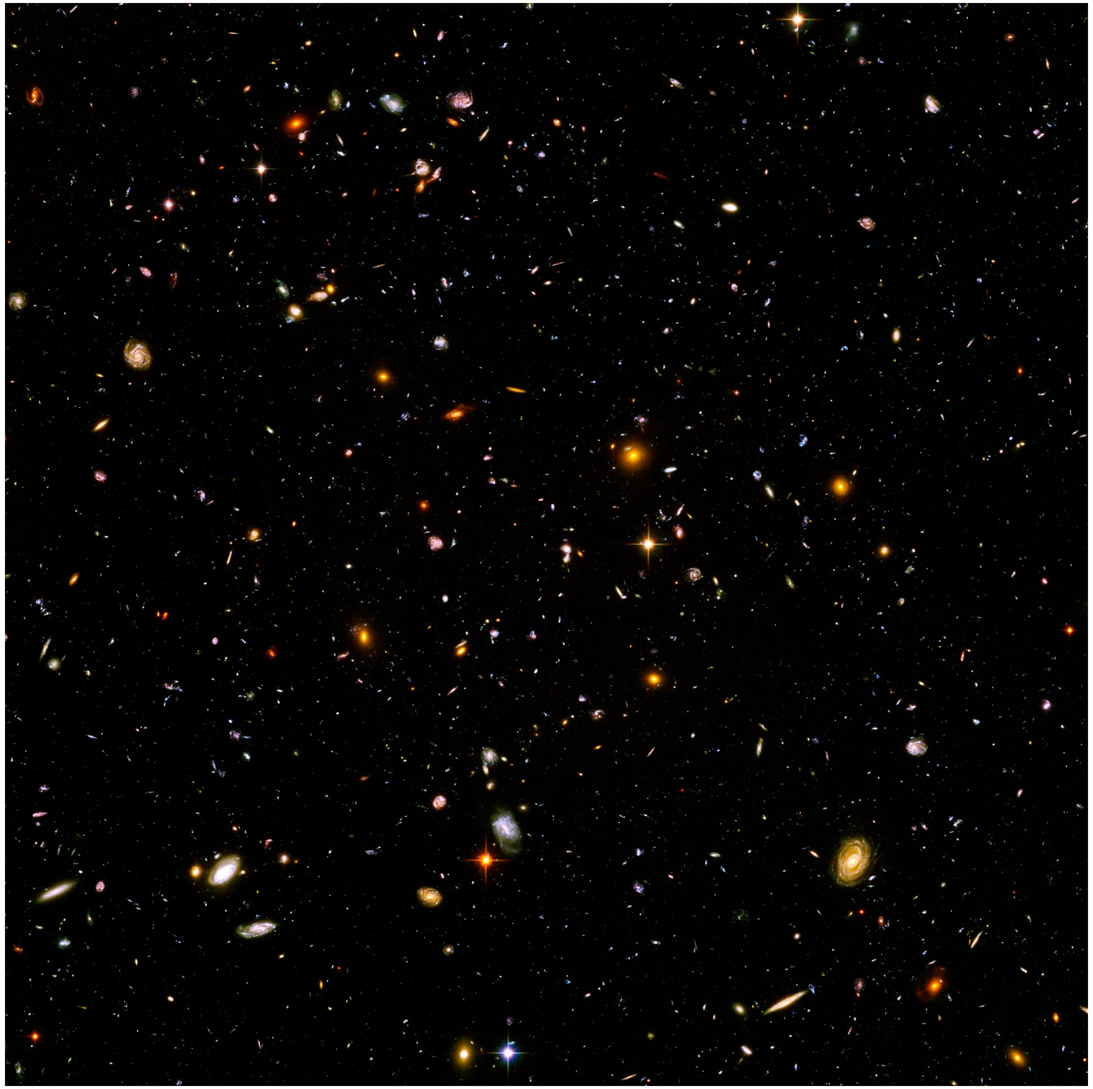


$v_S = 0$

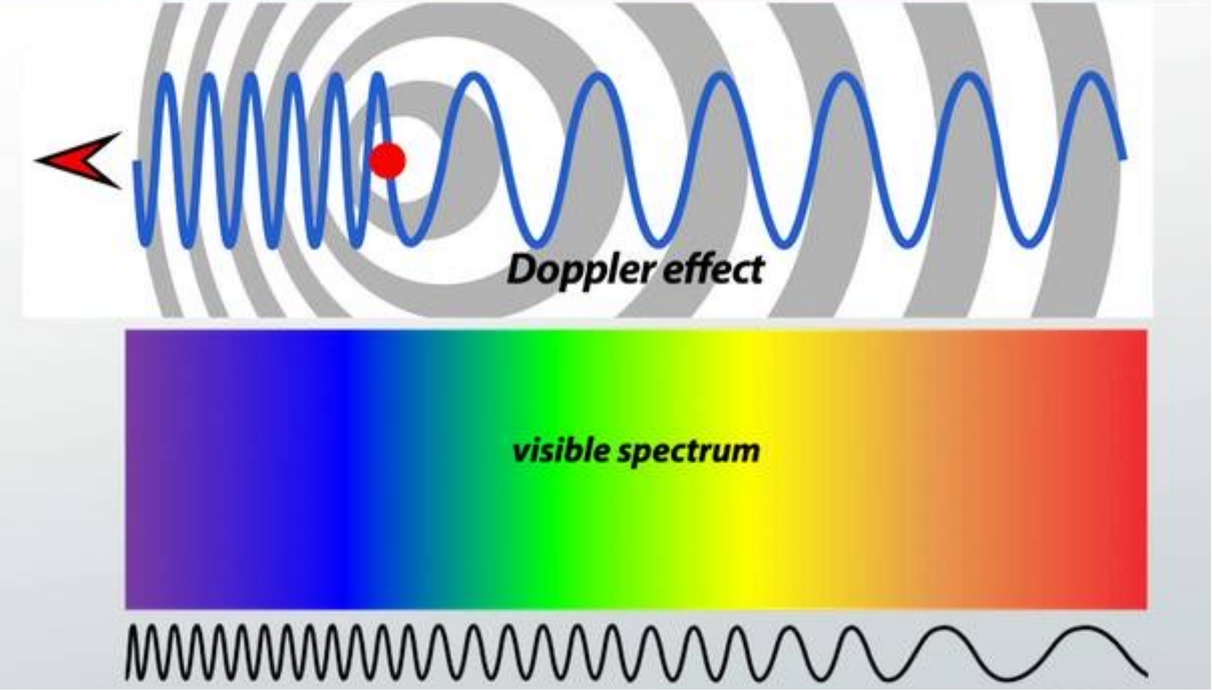


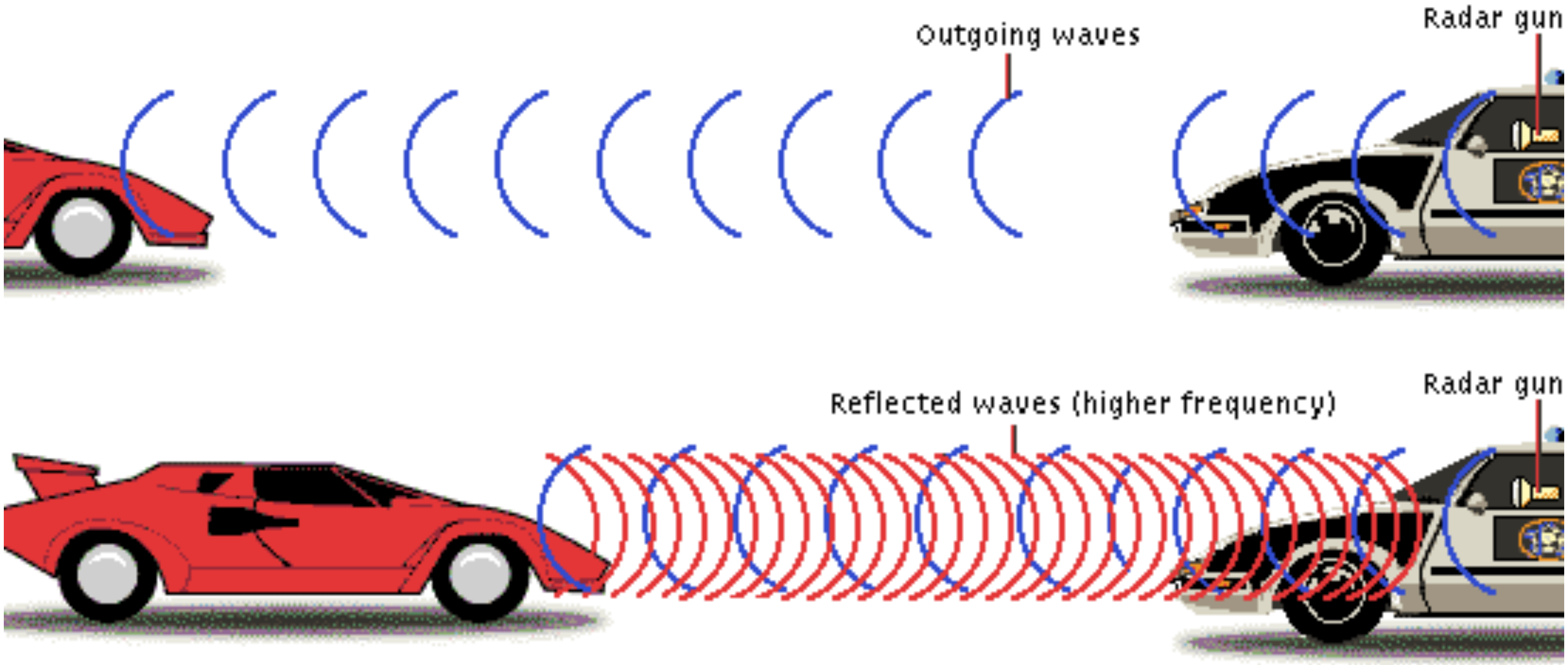
$v_S = 0.7v$

$$\frac{\nu_0}{\nu_S} = \frac{v - v_0}{v - v_S}$$

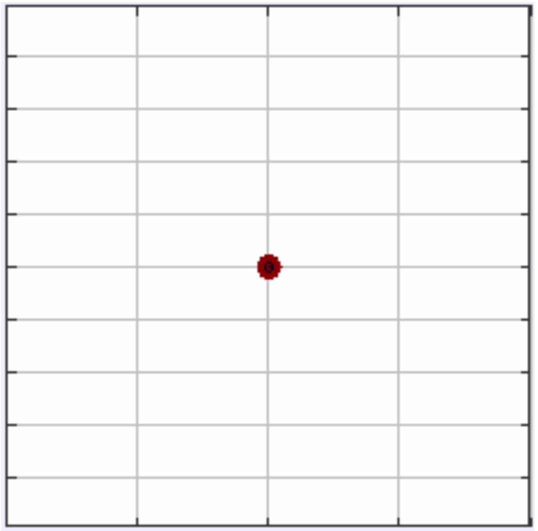


Champ ultra-profond de Hubble

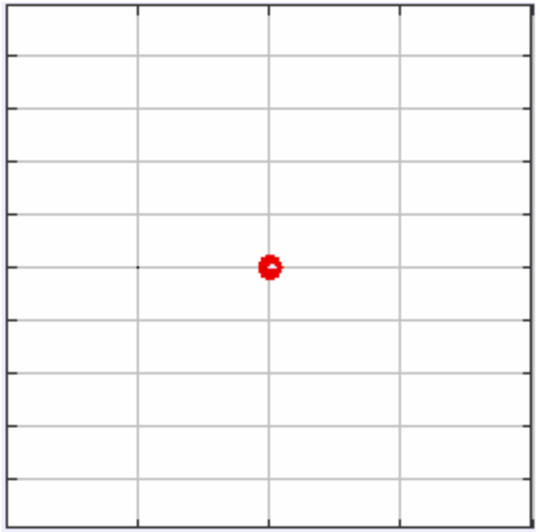



Outgoing waves
Radar gun
Reflected waves (higher frequency)
Radar gun

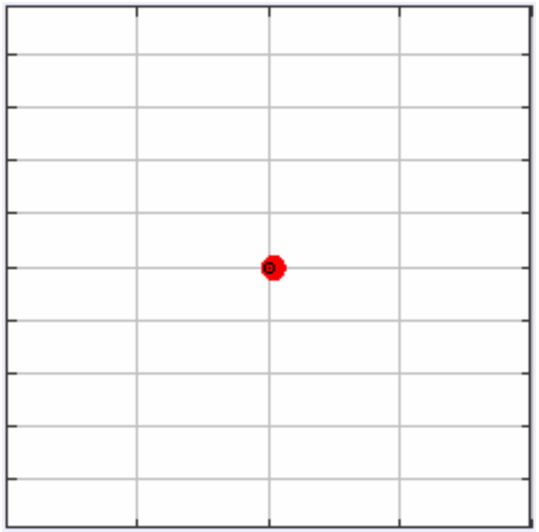
1.2.3 L'onde de choc



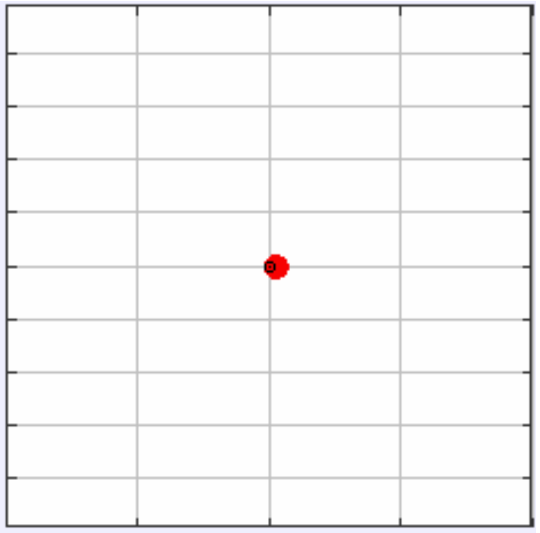
$v_S = 0$



$v_S = 0.7v$



$v_S = v$

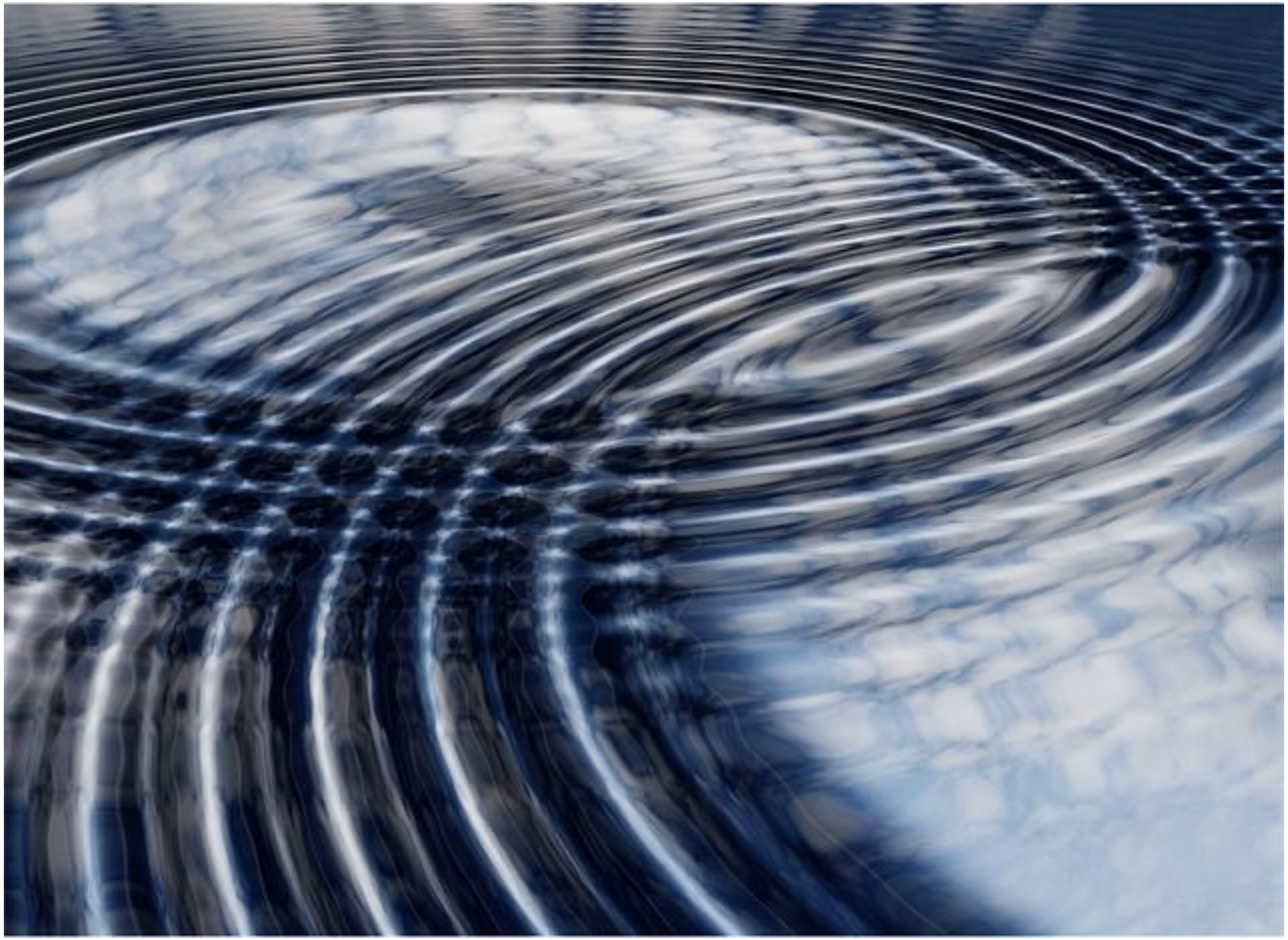


$v_S = 1.4v$

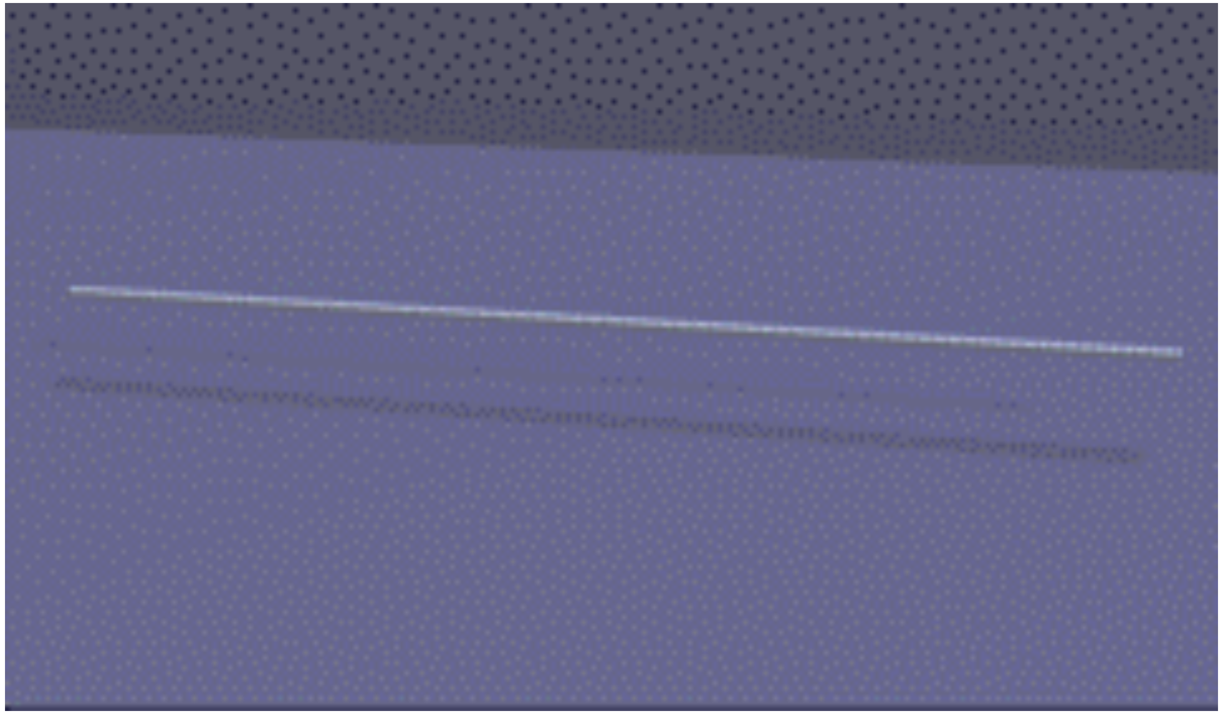
1.2.3 L'onde de choc

$$\sin\alpha = \frac{v}{v_S}$$

1.3 Superposition d’ondes



1.3.1 Principe de superposition

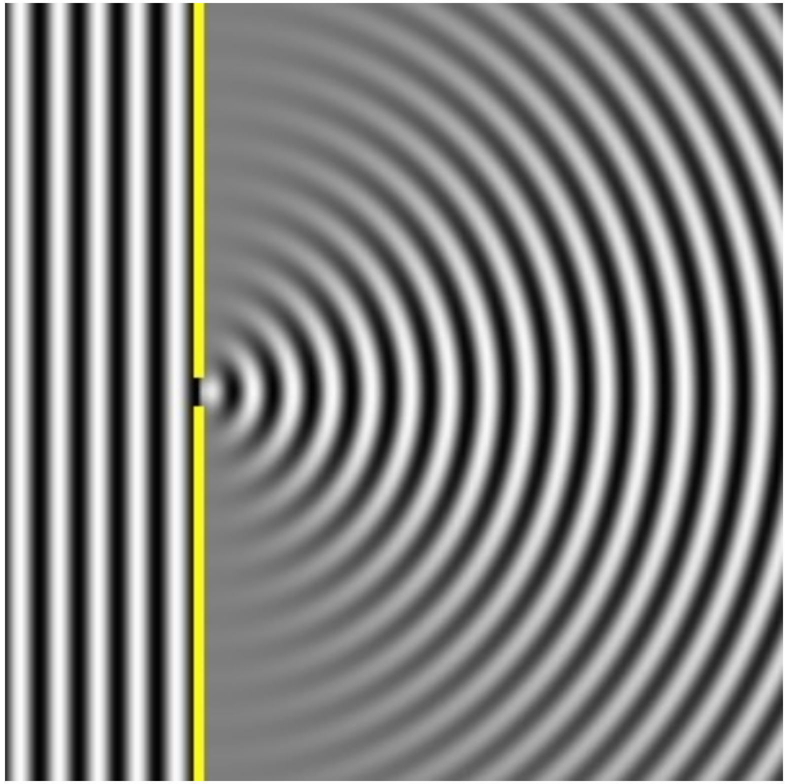


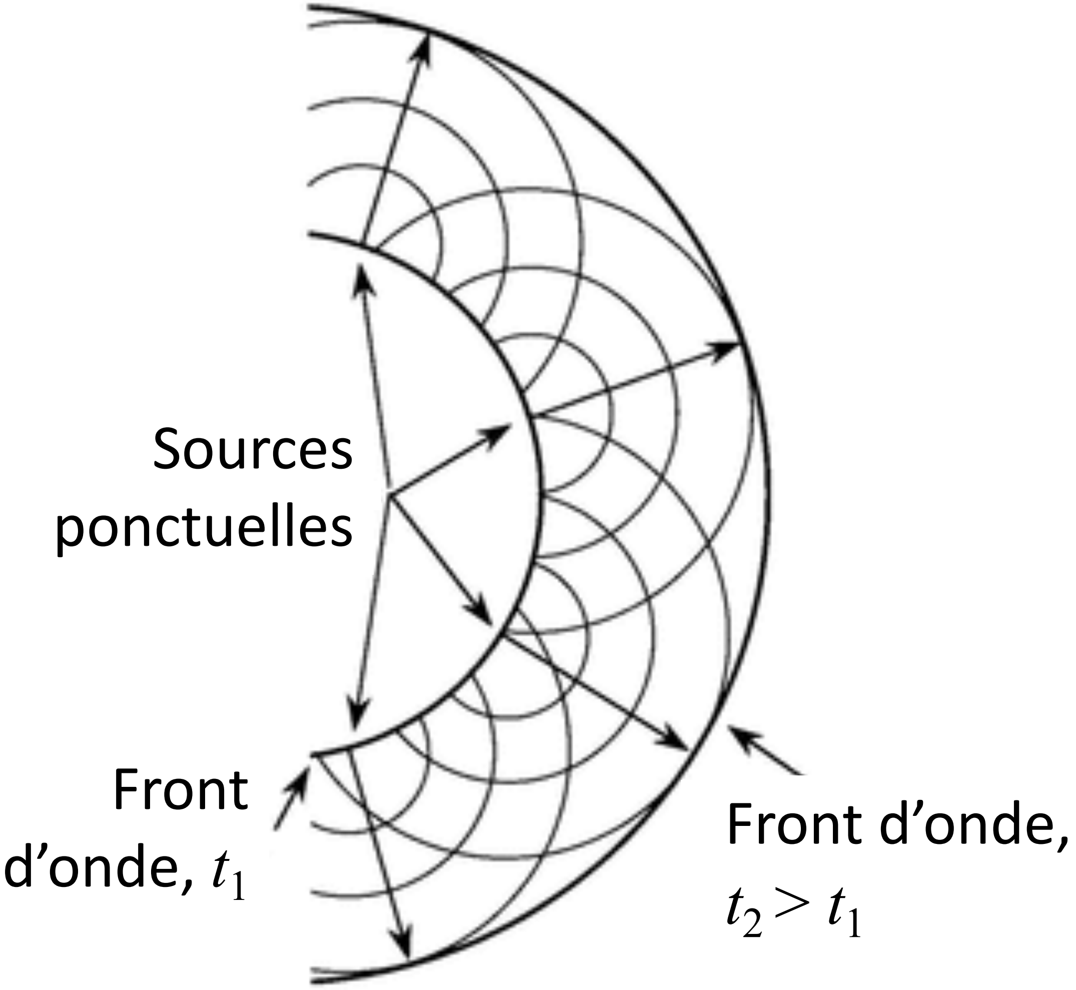
$$\frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t^2} = u^2 \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 \xi_2}{\partial t^2} = u^2 \frac{\partial^2 \xi_2}{\partial x^2}$$

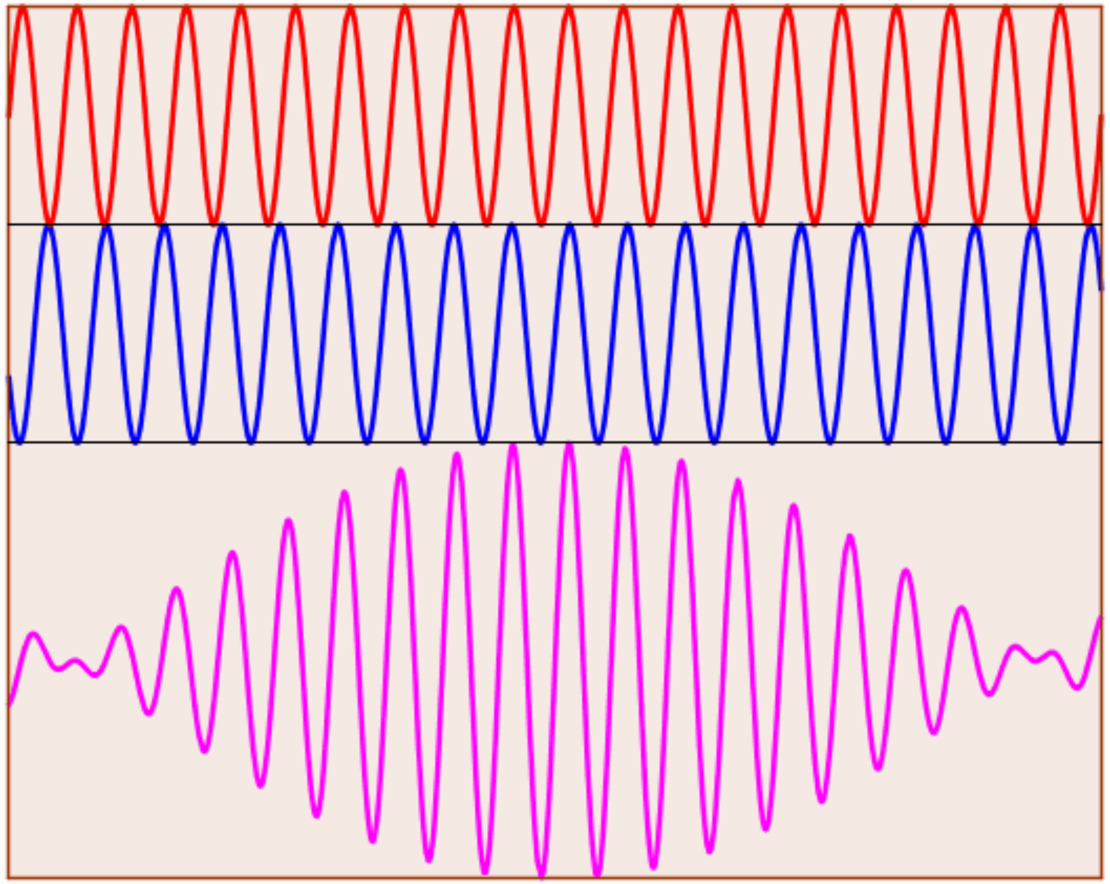
$$\Rightarrow \quad \frac{\partial^2 (\xi_1 + \xi_2)}{\partial t^2} = u^2 \frac{\partial^2 (\xi_1 + \xi_2)}{\partial x^2}$$

Principe d'Huygens





1.3.2.1 Battements



$$A\sin(\omega_1 t) + A\sin(\omega_2 t) = 2A\sin\left(\frac{\omega_1+\omega_2}{2}t\right)\cos\left(\frac{\omega_1-\omega_2}{2}t\right)$$

Série 3

Série 3 : Effet Doppler, onde de choc

1 Test des sirènes d'alarme

On désire connaître la distance jusqu'à laquelle une sirène peut être entendue. On suppose qu'une sirène émet une onde sonore sphérique. Sa puissance est notée P et émet à une fréquence notée f.

(a) Calculer l'intensité sonore, l'amplitude de déplacement des molécules d'air et l'amplitude de la variation de pression en tout point de l'espace. Calculer ces différentes valeurs (intensité, amplitude de vibration et de variation de pression) à 1km de la sirène.

(b) À quelle distance r_{max} la sirène cesse d'être perceptible (i.e. $I < I_{\text{seuil}}$) si on considère que le paramètre d'atténuation est de α (en km^{-1}) ? Donner une expression pour r_{max} et la résoudre graphiquement.

Indications

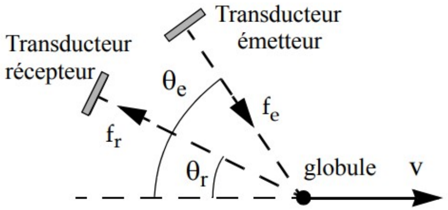
— La vitesse du son est $u = \sqrt{K/\rho}$, où K est le coefficient de compressibilité et ρ la densité massique du milieu.

— Le paramètre d'atténuation α permet de caractériser une atténuation exponentielle de l'amplitude de l'onde sonore. L'amplitude ξ_0 est alors $K\xi_0$, avec le facteur d'atténuation K vérifiant $dK = -\alpha K dx$.

Applications numériques : $P = 1000$ W, $f = 200$ Hz, $\rho = 1.293$ kg/m^3, $u = 343$ m/s, $I_{\text{seuil}} = 10^{-12}$ W/m^2, $\alpha = 4.605 \cdot 10^{-1}$ km^{-1}

2 Échographie Doppler

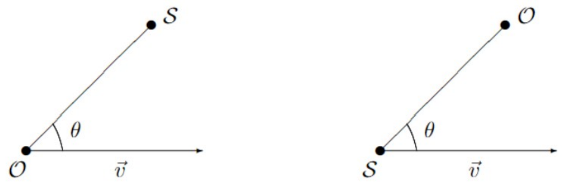
L'échographie Doppler est un examen médical très répandu et l'une des applications les plus notables de l'effet Doppler en médecine. Il permet de mesurer avec précision le débit sanguin dans les vaisseaux sanguins à l'aide d'ultrasons. Dans cet exercice, on propose de comprendre son fonctionnement. Les transducteurs sont placés comme montré ci-contre. On suppose que les angles θ_e et θ_r sont approximativement égaux, i.e $\theta_e \approx \theta_r = \theta$. On appelle u la vitesse de propagation des ultrasons dans les tissus et le sang.



Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de généraliser la formule de l'effet Doppler vue en cours. En effet, on a considéré l'observateur et la source se déplaçant sur un même axe. On souhaite dériver la fréquence perçue par l'observateur où la source ne se déplace pas dans l'axe observateur-source.

(a) Dériver l'expression de la fréquence perçue par un observateur en mouvement et une source immobile. L'angle entre le vecteur vitesse de l'écoulement sanguin $\vec{v}$ et la direction où se trouve la source est noté θ (voir Figure a)). On considère que $v \ll u$ où v est la vitesse de l'observateur.

(b) Répéter ce raisonnement pour le cas d'une source en mouvement et d'un observateur immobile (voir Figure b).)



a) b)

(c) Appliquer ces résultats afin de dériver la fréquence perçue par le transducteur récepteur en fonction de la fréquence émise par le transducteur émetteur. En déduire une expression pour la vitesse des globules rouges en fonction de la fréquence Doppler, $f_D = |f_r - f_e|$.

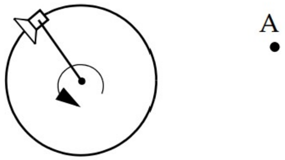
(d) Calculer numériquement la vitesse des globules rouges
Application numérique : $f_D = 1200$ Hz, $u = 1500$ m/s, $f_e = 8$ MHz, $\theta = 60°$

Jusqu'à présent, l'atténuation des tissus a été négligée. Toutefois, afin d'éviter un échauffement trop important des tissus, l'intensité de l'onde émise est limitée à une valeur $I_{\max}$. L'atténuation des tissus humains est importante et est dénotée α. On considère que l'artère mesurée se trouve à une profondeur P de l'épiderme.

(e) Calculer l'intensité de l'onde reçue. En déduire également son amplitude. Application numérique : $P = 5$ cm, $\alpha = 57.5$ m^{-1}, Densité des tissus : $\rho = 10^3$ kg/m^3, $I_{\max} = 0.01$ W/m^2

3 Haut-Parleur tournant

Un haut-parleur est fixé à l'extrémité d'un bras de longueur R tournant à vitesse angulaire ω. Il émet une onde de fréquence f.



(a) Déterminer la fréquence perçue par un observateur A immobile, situé à distance d de l'axe du bras, en fonction de f, d, R, ω et du temps

(b) Déterminer les fréquences minimale et maximale perçues par l'observateur A et les calculer numériquement.
Applications numériques : $f = 500$ Hz, $R = 1$m, $d = 3$m, $\omega = \frac{2\pi}{3}$ rad/s

(c) Quelle(s) fréquence(s) sont perçues par l'observateur A s'il se trouve au centre du cercle ?

4 Avion supersonique

Un avion supersonique vole à Mach 3 ($v_{\text{avion}} = 3u_{\text{son}}$) à une altitude A. Un observateur au sol déclenche son chronomètre lorsque l'avion passe au-dessus de sa tête.

(a) Calculer l'instant τ où l'onde de choc sera perçue par l'observateur et la distance parcourue par l'avion pendant ce temps.

(b) On considère à présent qu'il y a du vent qui souffle dans la même direction que l'avion. Le vent est constant à toute altitude. Dériver de nouveau l'instant τ ainsi que la distance parcourue par l'avion pendant ce temps.
Applications numériques : $A = 20$ km, $u_{son} = 348$ m/s, $v_{\text{vent}} = 14$ m/s