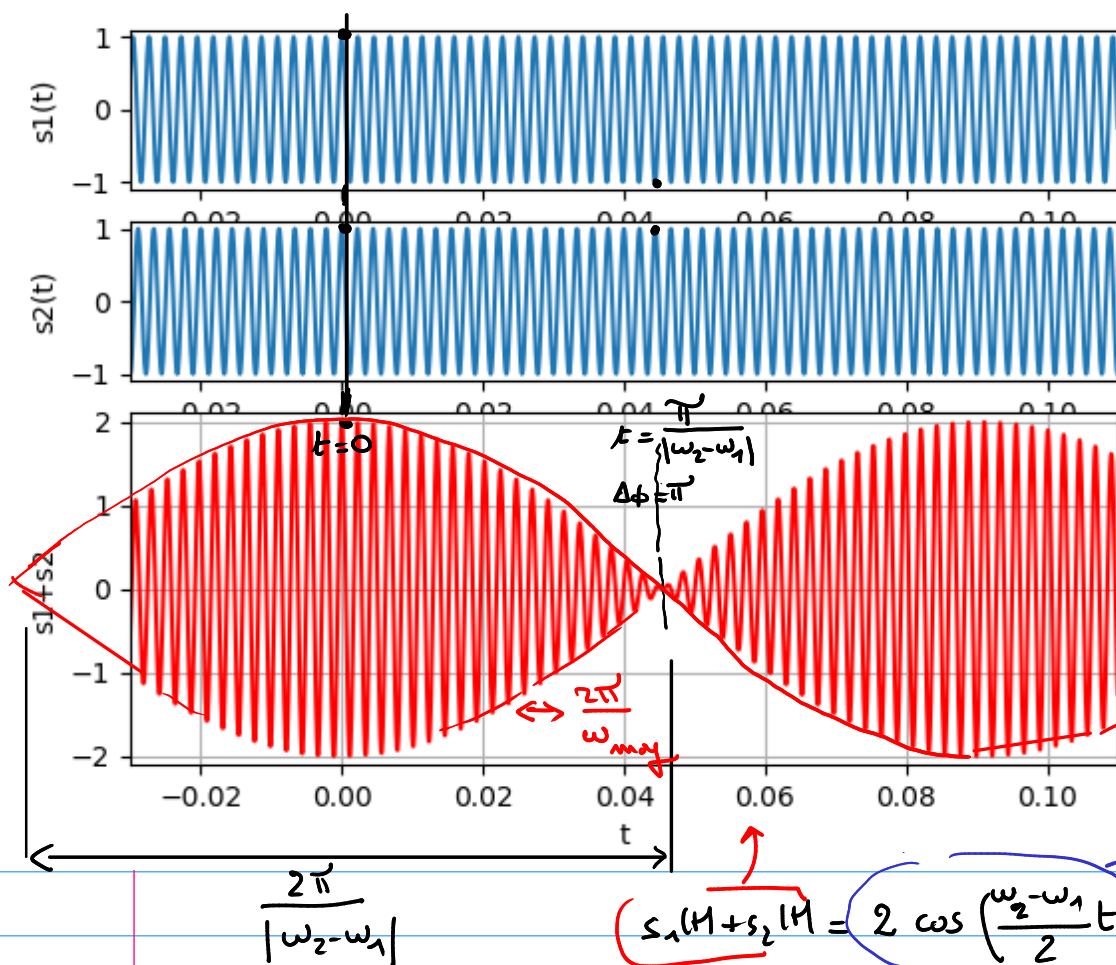




$$s_1(t) = \cos(\omega_1 t)$$

$$\rightarrow t: \omega_2 \gg \omega_1$$

$$s_2(t) = \cos(\omega_2 t)$$

$$\rightarrow \text{phasage } \omega_2 t - \omega_1 t$$

$$\Delta \phi =$$

$$s_1(t) + s_2(t) = 2 \cos\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t\right) \times \cos\left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2} t\right)$$

$\swarrow$ varie lentement $\swarrow$ varie vite.
 ω_{moy}

	Période	Pulsat	Fréquence
Battements	$\frac{2\pi}{ \omega_2 - \omega_1 }$	$ \omega_2 - \omega_1 $	$ f_2 - f_1 $
Oscillations (porteuse)	$\frac{2\pi}{\omega_{\text{moy}}}$	ω_{moy}	$f_{\text{moy}} = \frac{f_1 + f_2}{2}$

$$\omega = 2\pi f$$

rad.s⁻¹ Hz
= s⁻¹

Un son non sinusoïdal mais périodique à 73,416 Hz

"contient" des sinusoïdes à

Fondamental $1 \times 73,416$

Harmoniques $\left\{ \begin{array}{l} 2 \times 73,416 \\ 3 \times 73,416 \\ 4 \times \text{---} \\ 5 \times \text{---} \end{array} \right.$

$$6 \times 73,416 = \underline{440,5 \text{ Hz}}$$

Ex^a:

Diapason à 440 Hz
(sinus)

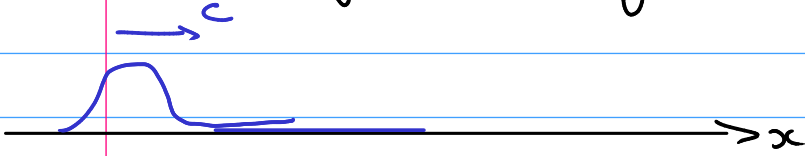
Un signal créneau à 146 Hz

contient $\left\{ \begin{array}{l} 146 \text{ Hz} \\ (292) \\ 438 \text{ Hz} \leftarrow \\ () \\ 720 \text{ Hz} \end{array} \right.$

Propagation.

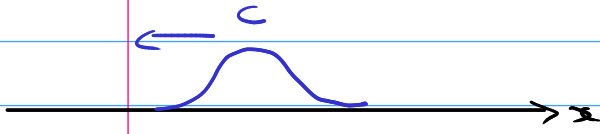
Onde progressive

$$y(x,t) = f\left(t - \frac{x}{c}\right) \quad \text{se propage vers } +\vec{e}_x$$



c célérité de l'onde
= vitesse de propagation

$$y(x,t) = g\left(t + \frac{x}{c}\right) \quad \text{se propage vers } -\vec{e}_x$$

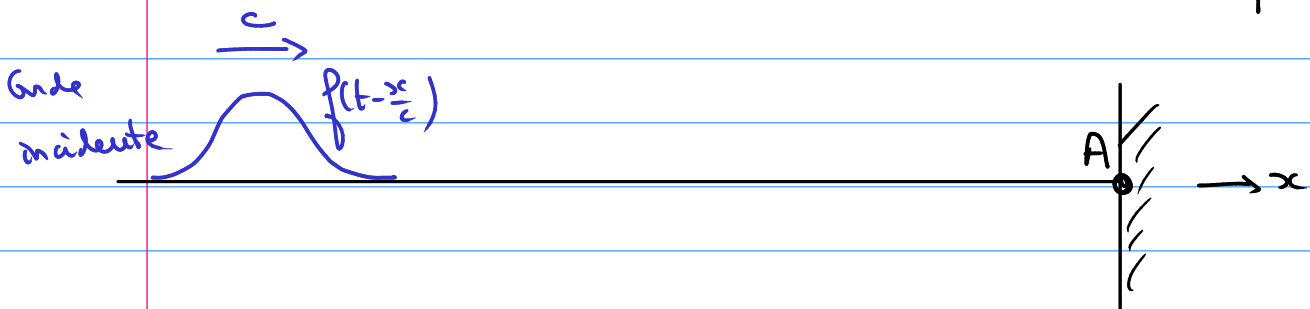


$$y(x,t) = f\left(t - \frac{x}{c}\right) + g\left(t + \frac{x}{c}\right)$$

onde $\rightarrow$
onde $\leftarrow$

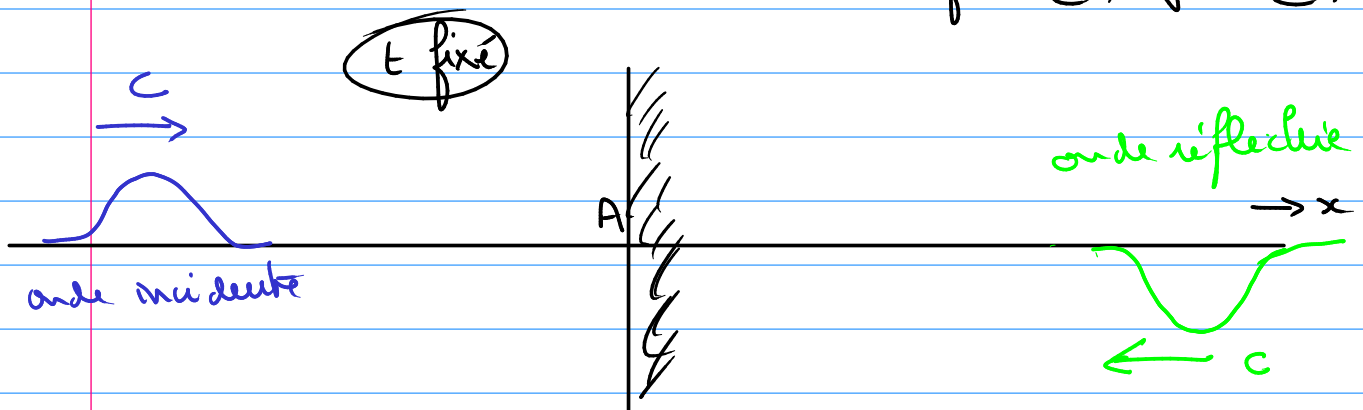
peut tout à fait exister

ce qui peut créer l'onde $g\left(t + \frac{x}{c}\right)$: une réflexion sur un point fixe



L'onde réfléchi :

- se propage vers $-\vec{e}_x$
- à la même célérité c
- telle que $f\left(t - \frac{x_A}{c}\right) + g\left(t + \frac{x_A}{c}\right) = 0 \quad \forall t$



Onde progressive harmonique

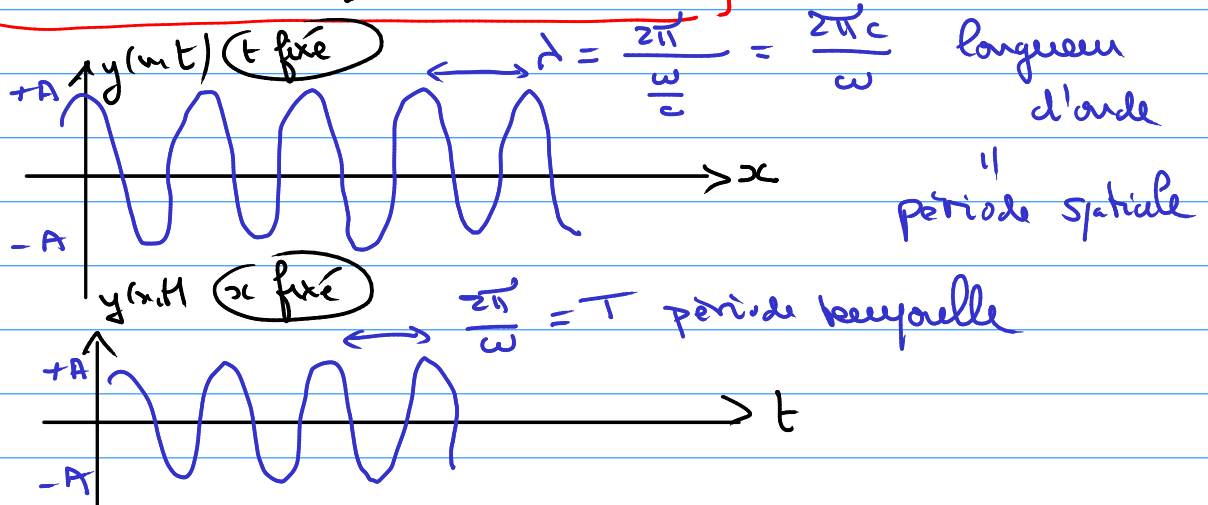
↓
= sinusoïdal.

= monochromatique

Onde se propage vers $+\vec{e}_x$: $y(x,t) = f(t - \frac{x}{c})$

avec $f(u) = A \cos(\omega u + \varphi)$

→ $y(x,t) = A \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) + \varphi \right]$



Onde progressive harmonique se propageant vers $-\vec{e}_x$:

$y(x,t) = B \cos \left[\omega \left(t + \frac{x}{c} \right) + \varphi \right]$

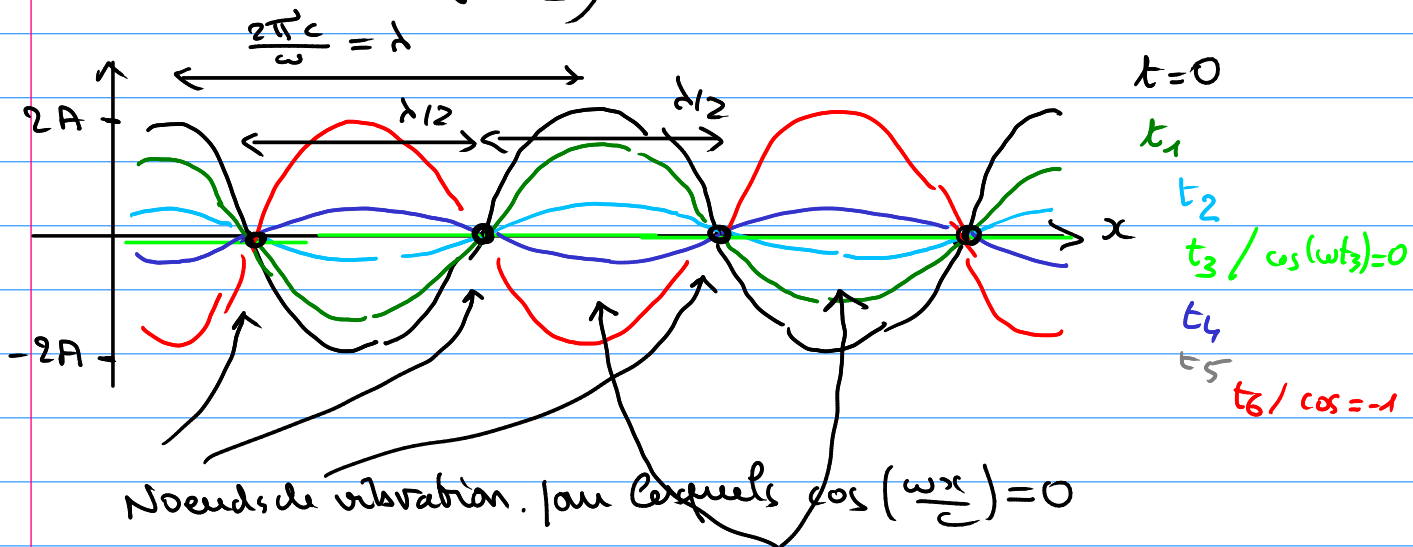
Onde stationnaire :

Superposition (= somme) de 2 ondes progressives harmoniques :

- de même pulsation ω
- de même amplitude A
- se propageant en sens opposés

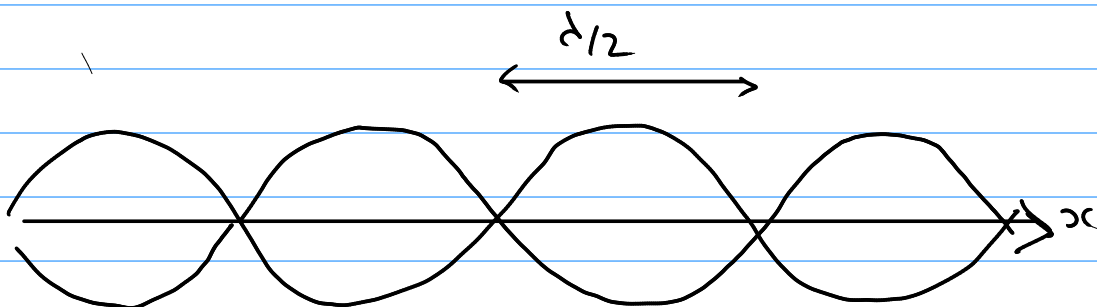
$$A \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right] + A \cos\left[\omega\left(t + \frac{x}{c}\right)\right]$$

$$= 2A \cos(\omega t) \cos\left(+\frac{\omega x}{c}\right)$$

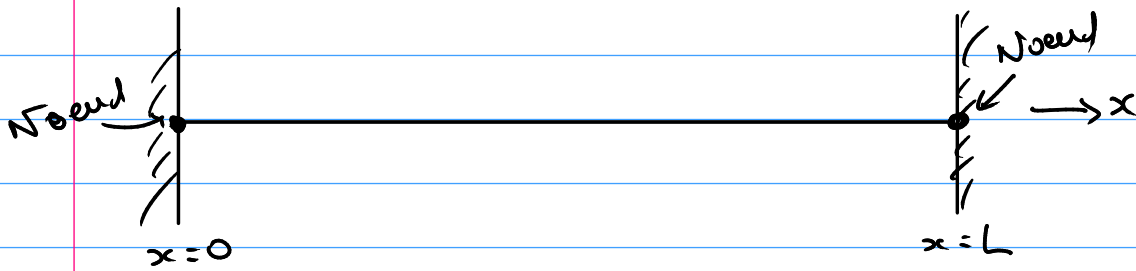


Noeuds de vibration : pour lesquels $\cos\left(\frac{\omega x}{c}\right) = 0$

Pts d'amplitude max : ventres de vibration.



Exemple: corde fixée à ses 2 extrémités
longueur L



Les seules ondes harmoniques qui peuvent exister sur cette corde sont les ondes stationnaires qui ont

$$\begin{aligned} & \text{— un noeud en } x=0 \\ \text{ET } & \text{— un noeud en } x=L \end{aligned} \Rightarrow L = n \frac{\lambda}{2} \quad n \in \mathbb{N}^*$$

$$\begin{aligned} \lambda & \text{ ne peut prendre que les valeurs } \lambda_n = \frac{2L}{n} \\ f = \frac{c}{\lambda} & \quad \quad \quad f_n = n \frac{c}{2L} \quad \text{les } f \text{ propres} \\ \omega = 2\pi f & \quad \quad \quad \omega_n = n\pi \frac{c}{L} \quad \text{les pulsations propres} \end{aligned}$$

Ondes stationnaires = Modes propres

Quand on excite un système physique à UNE de ses fréquences propres : RÉSONANCE

Célérité des ondes mécaniques :

- Sur une corde

$$c = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

T tension de la corde (N)
 μ masse linéique (kg.m⁻¹)

- ondes sonores dans 1 gaz

$$c = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}}$$

$R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 T temp (en K)
 M masse molaire (kg.mol⁻¹)

- ondes sonores dans 1 solide

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

ρ masse vol (kg.m⁻³)
 E module Young du solide (Pa)
 décrit la rigidité du milieu

acier $E \sim 2 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$
bois $\sim 10^{10} \text{ Pa}$
caoutchouc $10^6 \text{ à } 10^8 \text{ Pa}$

$\gamma = \frac{7}{5}$ gaz diatomique
 $\frac{5}{3}$ monoatomique

$$c = \sqrt{\frac{\text{"rigidité"}}{\text{"densité"}}}$$

Ondes
mécaniques.

Ex 5 : $l = 3 \frac{\lambda}{2}$ $\lambda = \frac{c}{f}$ $c = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$

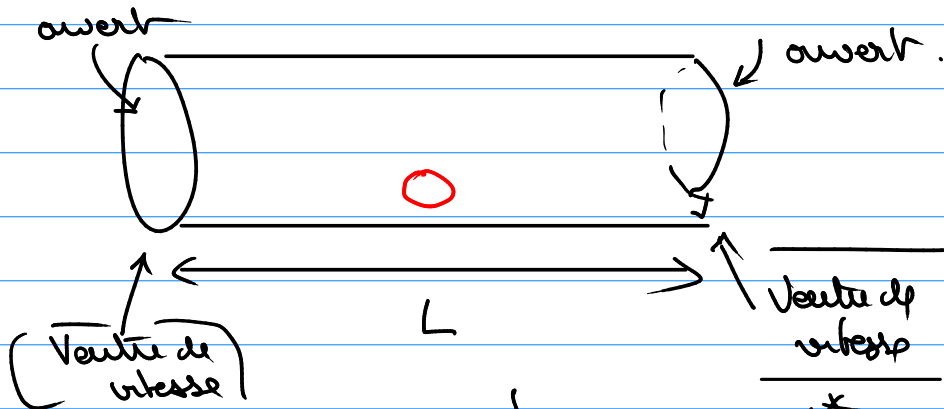
$$\mu = \frac{m}{l}$$

$$\text{Tension } T = \mu c^2 = \mu f^2 \lambda^2 = \mu f^2 \left(\frac{2}{3}l\right)^2$$

$$T = \frac{m}{l} f^2 \frac{4}{9} l^2 = \frac{4}{9} m f^2 l$$

→ c)

Ex 6



$$L = n \times \frac{\lambda}{2}$$

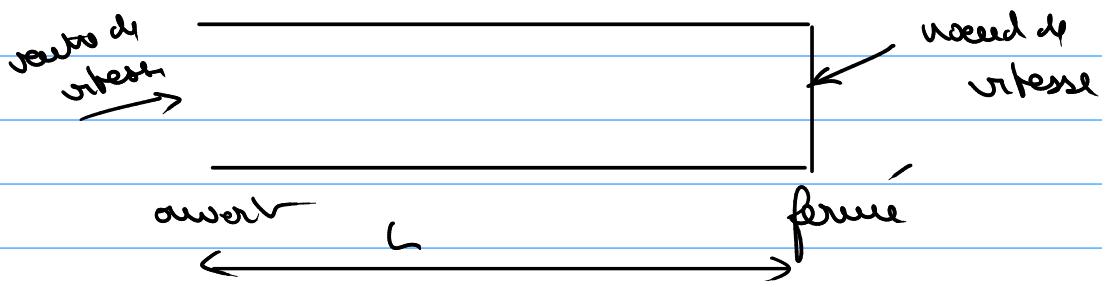
$$n \in \mathbb{N}^*$$

$$f_n = n \frac{c}{2L}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{c}{2L} = f_1 \text{ fondamental} \\ 2f_1 \\ 3f_1 \\ 4f_1 \end{array} \right\} \text{ Harmoniques}$$

$$f_1 = \frac{1}{2L} \times \sqrt{\frac{YRT}{M}}$$

→ c)



$$L = \frac{\lambda}{4} + n \frac{\lambda}{2}$$

$$n \in \mathbb{N}$$

$$L = (2n+1) \frac{\lambda}{4}$$

λ ne peut prendre que les valeurs $\lambda_n = \frac{4L}{2n+1}$

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad \quad \quad f_n = (2n+1) \frac{c}{4L}$$

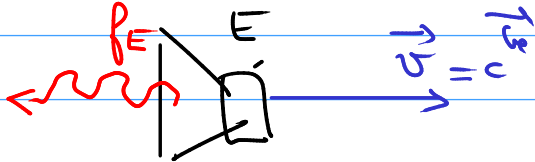
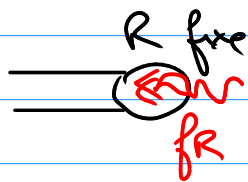
Exercice $f_0 = \frac{c}{4L}$, $3f_0, 5f_0, 7f_0, \dots$

Effet Doppler:

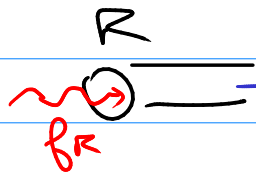
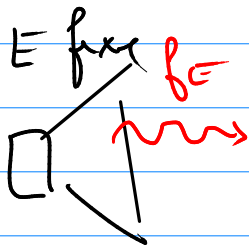
Se produit dès qu'il y a mouvement relatif entre l'émetteur E d'un onde et un récepteur R

Onde: son, lumière, vagues, ...

Ex:



$$f_R = \frac{f_E}{1 + \frac{v}{c}}$$



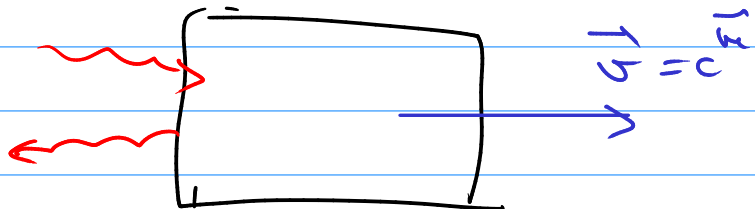
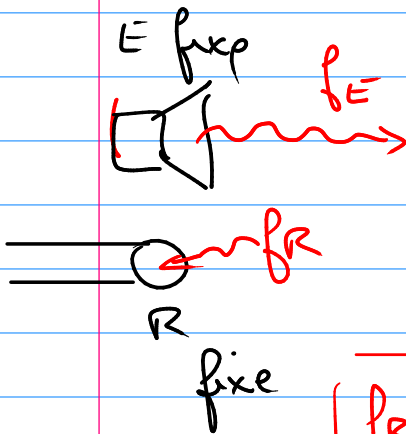
$$f_R < f_E$$

$$f_R > f_E$$

$v > 0$ éloigné
 $v < 0$ rapproché.

$$f_R = f_E \left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

en formule à l'ordre 1 en $\frac{v}{c}$.



$$f_R = \frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} f_E \approx (1 - 2 \frac{v}{c}) f_E$$

$v > 0$ éloigné
 $v < 0$ rapproché.

$c_{\text{son}} \approx 340 \text{ m.s}^{-1}$

$c_{\text{onde élem}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

ex 1: $v < 0 \quad f_R = \left(1 + \frac{2||\vec{v}||}{c}\right) f_E$

Battements avec f_R et f_E

$F_{\text{be}} \text{ des battements: } f_R - f_E = 2 \frac{||\vec{v}||}{c} f_E$

$F_{\text{be}} \text{ au porteur } \frac{f_R + f_E}{2} = f_E + f_E \frac{||\vec{v}||}{c}$

→ a)

Universe;

