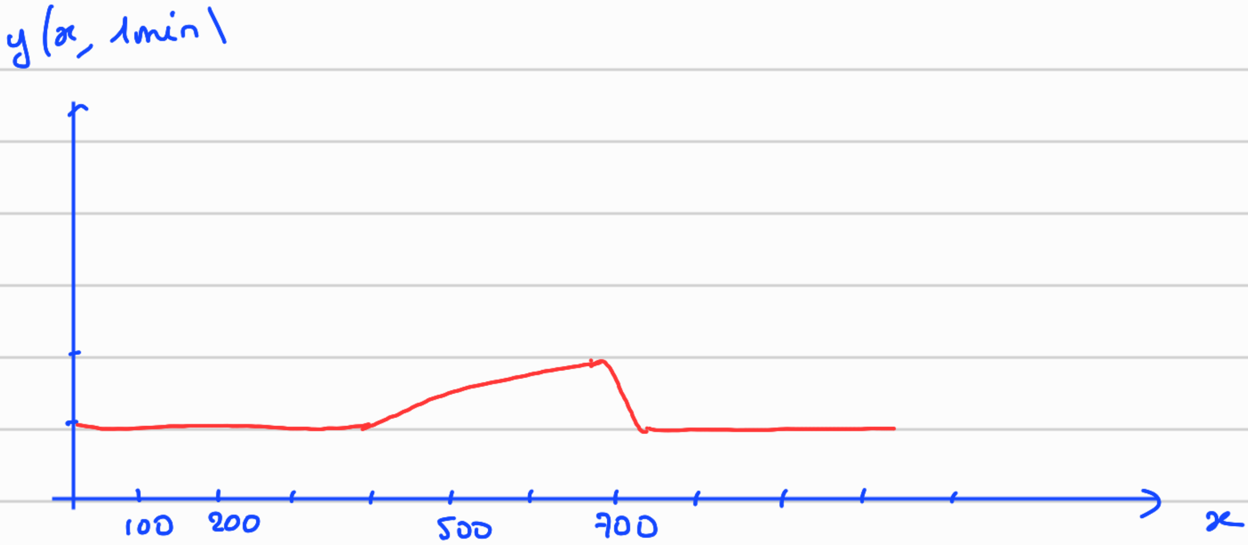
Correction du TD11

Exercice 1

Q1. En 1 minute, le mascaret parcourt la distance $d = c\,\Delta t$

AN : $d = \dfrac{20.10^3}{60} \times 1 = 333$ m.

* le front se trouve donc à $400 + 333 = 733$ m.
* la queue se trouve à $50 + 333 = 383$ m.
* le maximum se trouve à $350 + 333 = 683$ m



Q2. le front de la vague sera en $x_s = 2$ km au bout d'une durée Δt telle que $(x_s - x_i) = c\,\Delta t$

$\Delta t = \dfrac{x_s - x_i}{c}$ AN : $\Delta t = \dfrac{2.10^3 - 0{,}4.10^3}{20.10^3/60}$

$\Delta t = 4{,}8$ min

Q3. * A $t=0$ le front est en $x_{F0} = 400$ m.
Il sera en x_d au bout de $t_{F,d} = \dfrac{x_d - x_{F0}}{c}$

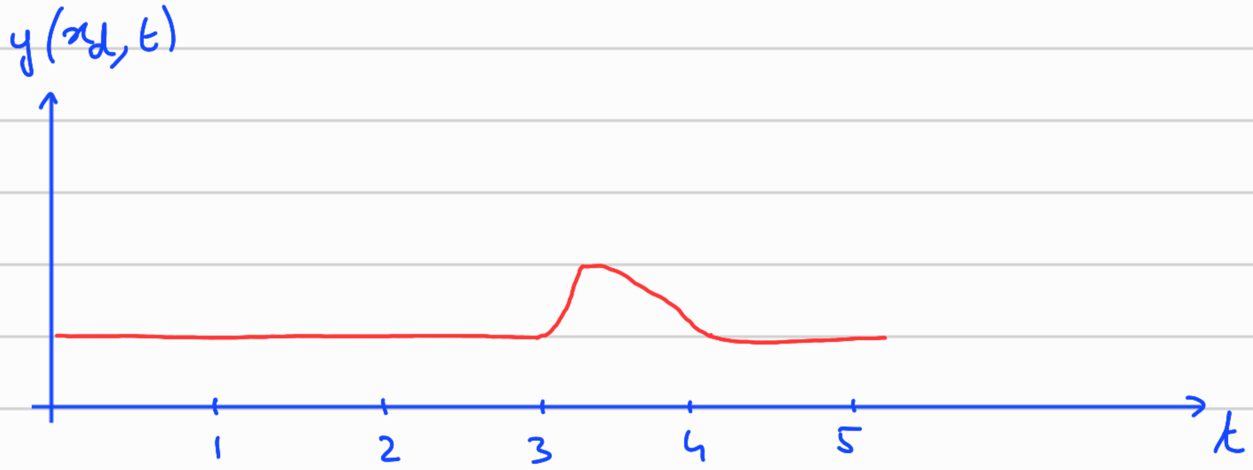
AN : $t_{F,d} = \dfrac{1400 - 400}{20\,000/60} = \underline{3 \text{ min}}$

* A $t=0$ le maximum est en $x_{m,0} = 350$ m
Il sera en x_d au bout de $t_{m,d} = \dfrac{x_d - x_{m,0}}{c}$

AN : $t_{m,d} = \dfrac{1400 - 350}{20\,000/60} = \underline{3{,}15 \text{ min}}$

* A $t=0$ la queue est en $x_{q,0} = 50$ m
Il sera en x_d au bout de $t_{q,d} = \dfrac{x_d - x_{q,0}}{c}$

AN : $t_{q,d} = \dfrac{1400 - 50}{20\,000/60} = \underline{4{,}05 \text{ min}}$



Autre méthode : avec le formalisme

$f(x,t) = f(x - ct, 0)$

Pour $x_d = 1,4$ km $\quad f(x,t) = f(x-ct, 0)$

$f(x,t) = f(x - 333t, 0)$

Pour $x = x_d = 1400$ m

$f(x,t) = f(1400 - 333t ; 0)$

t/min	y
0	$f(1400, 0) = 0$
3	$f(1400 - 3.333 ; 0) = f(400, 0) = 0$
3,15	$f(1400 - 3{,}15.333 ; 0) = f(351 ; 0) = y_{max}$
4,05	$f(1400 - 4{,}05.333 ; 0) = f(50 ; 0) = 0$

Q4. La vitesse de l'onde augmente avec la hauteur d'eau sous ce point, donc la partie haute de la vague (la crête) va plus vite que le reste de la vague, la vague déferle.

Exercice 2 :

Q1 : onde progressive dans le sens des x croissants.

$s_1(x,t) = A\cos\left(\omega\left(t - \frac{kx}{\omega}\right) + \phi\right) = f\left(t - \frac{x}{c}\right)$

$\Rightarrow$ célérité $c = \frac{\omega}{k}$

Q2. ce n'est pas une onde progressive
les variables x et t sont dans
2 fonctions différentes.

Q3. : onde progressive dans le sens des
x croissants.

$$s_3(x,t) = A e^{-\left(\frac{x+ct}{\delta}\right)^2} = f(x+ct)$$

donc $c = c$.

Q4. ce n'est pas une onde progressive
(superposition d'un signal se
propageant vers les x croissants et
d'un signal se propageant vers les
x décroissants).

Q5. onde progressive dans le sens des
x croissants.

$$s_5(x,t) = A\cos\left(\omega\left(t-\frac{k}{\omega}x\right)\right) + B\sin\left(2\omega\left(t-\frac{k}{\omega}x\right)\right)$$

$$= f\left(t-\frac{x}{c}\right)$$

$\Rightarrow$ célérité $c = \dfrac{\omega}{k}$

Q6. onde progressive dans le sens des x
décroissants

$$s_6(x,t) = A\sin\left(\omega\left(t+\frac{kx}{\omega}\right)\right)$$

$\Rightarrow$ célérité $= c = \dfrac{\omega}{k}$

Q7. onde progressive dans le sens des x croissants :
$$s_7(x,t) = A\cos\left(\omega\left(t-\frac{x}{2b}\right)\right) = f\left(t-\frac{x}{c}\right)$$
$\Rightarrow$ célérité $c = 2b$.

Q8. ce n'est pas une onde progressive.

Q9. ce n'est pas une onde progressive.

Q10. onde progressive dans le sens des y croissants :
$$s_{10}(x,t) = A e^{-k'(y-ct)} \cos(k''(y-ct)) = f(y-ct)$$
$\Rightarrow$ célérité $= c$

Exercice 3 : voir cours

Exercice 4 :

Q1. Signal v_1 (trait plein) :
Amplitude : $V_{1,m} = 1{,}4\,V$
Valeur moyenne : nulle
Période : $T_1 = 3\,ms$
Fréquence : $f_1 = 333\,Hz$.

Signal v_2 (pointillés)
Amplitude : $V_{2,m} = 1{,}0\,V$
Valeur moyenne : nulle
Période : $T_2 = 3\,ms$
Fréquence : $f_2 = 333\,Hz$.

Q2. v_2 est en avance sur v_1 (atteint son maximum à une date antérieure), de $\Delta t = 1$ ms.

Q3 $\Delta\varphi_{2/1} = \dfrac{2\pi\Delta t}{T}$ >0 car v_2 en avance sur v_1.

avec $\Delta t = 1$ ms

$\Delta\varphi_{2/1} = \dfrac{2\pi . 1}{3} = 2,1$ rad. $(= 120°)$.

Q3. Phase à l'origine du signal v_1 :

$v_1(0) = V_{1m} \sin(\omega . 0 + \varphi_1)$

$0,75 = 1,4 \sin\varphi_1 \Rightarrow \varphi_1 = \arcsin(0,54) = 33°$

Phase à l'origine du signal v_2 :

$v_2(0) = V_{2m} \sin(0 + \varphi_2)$

$-1 = 1 \cancel{\sin} \sin(\varphi_2) \Rightarrow \varphi_2 = \arcsin(-1) = -90°$

Exercice 4 :

$$\sin\theta = \frac{L/2}{D} \quad \text{et} \quad \theta = \frac{\lambda}{a}$$

$\Rightarrow$ pour θ petit on a $\frac{L}{2D} \approx \frac{\lambda}{a}$

$$a = \frac{2\lambda D}{L}$$

AN : $a = \frac{2 \cdot 615 \cdot 10^{-9} \cdot 2{,}00}{18{,}8 \cdot 10^{-2}} = 1{,}309 \cdot 10^{-5}\, m$

$$\frac{u(a)}{a} = \sqrt{\left(\frac{u(\lambda)}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{u(D)}{D}\right)^2 + \left(\frac{u(L)}{L}\right)^2}$$

on suppose $u(\lambda)$ négligeable

$$\Rightarrow u(a) = a\sqrt{\left(\frac{u(D)}{D}\right)^2 + \left(\frac{u(L)}{L}\right)^2}$$

AN : $u(a) = 1{,}309 \cdot 10^{-5} \sqrt{\left(\frac{0{,}01}{2}\right)^2 + \left(\frac{0{,}4}{18{,}8}\right)^2}$

$$u(a) = 2{,}9 \cdot 10^{-7}\ m.$$

d'où $\underline{a = 13{,}09 \pm 0{,}29\ \mu m}$.

Exercice 5 :

Q1. $s(x,t) = s\left(0, t - \frac{x}{c}\right)$

$*$ si $t - \frac{x}{c} < 0 \iff x > ct \quad s(x,t) = 0$

$*$ si $0 \leq t - \frac{x}{c} \leq \tau \iff ct \leq x < c(t-\tau)$

$$s(x,t) = \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

$*$ si $t - \frac{x}{c} \geq \tau \Rightarrow x \leq c(t-\tau) \quad s(x,t) = 0$

$$s(x,t) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq c(t-\tau) \\ \sin\left(2\pi \frac{t - x/c}{T}\right) & \text{si } c(t-\tau) < x \leq ct \\ 0 & \text{si } x > ct \end{cases}$$

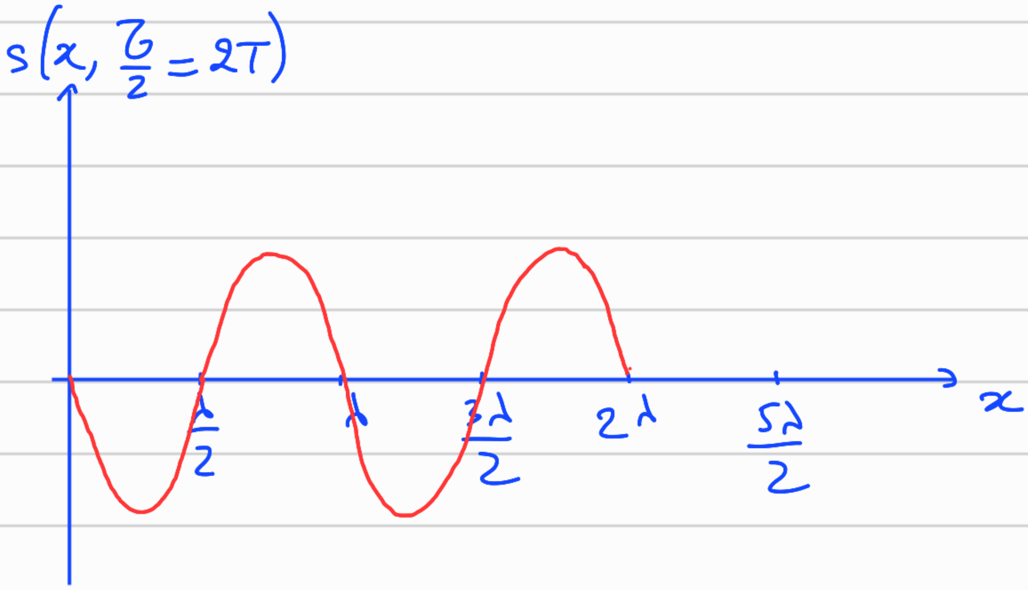
Q2. $\boxed{\text{Pour } t = \frac{\tau}{2}}$

$$s\left(x, \frac{\tau}{2}\right) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq -\frac{c\tau}{2} \\ \sin\left(2\pi \frac{\tau/2 - x/c}{T}\right) & \text{si } -\frac{c\tau}{2} < x \leq c\frac{\tau}{2} \\ 0 & \text{si } x > c\frac{\tau}{2} \end{cases}$$

or $x > 0$ donc $s\left(x, \frac{\tau}{2}\right) = \begin{cases} \sin\left(2\pi \cdot \left(2 - \frac{x}{\lambda}\right)\right) & \text{si } 0 \leq 2\lambda \\ 0 \text{ si } x > 2\lambda \end{cases}$

et $\tau = 4T$

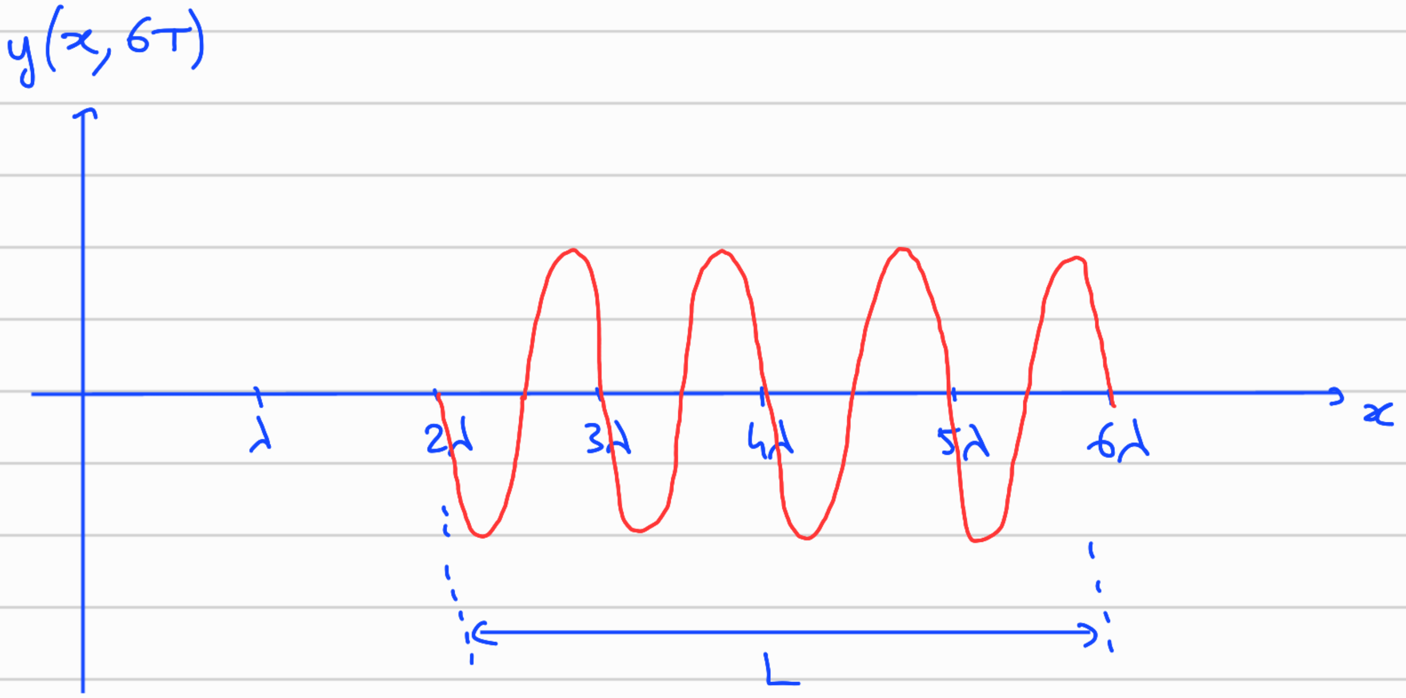
donc $s(x,2T) = \begin{cases} \sin\left(-\dfrac{2\pi x}{\lambda}\right) = -\sin\left(2\pi\dfrac{x}{\lambda}\right) & \text{si } 0 \le 2\lambda \\ 0 & \text{si } x > 2\lambda \end{cases}$



$$\boxed{\text{Pour } t = \frac{3\tau}{2} = 6T}$$

$$s(x,6T) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \le c(6T-4T) \\ \sin\left(2\pi\dfrac{6T - x/c}{T}\right) & \text{si } c(6T-4T) < x < c\cdot 6T \\ 0 & \text{si } x > 6cT \end{cases}$$

Soit $s(x,t) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \le 2\lambda \\ \sin\left(-2\pi\dfrac{x}{\lambda}\right) & \text{si } 2\lambda < x < 6\lambda \\ 0 & \text{si } x > 6\lambda \end{cases}$



$$L = 4\lambda = 4cT = c.\tau$$

Exercice 6 :

Q1. a) Phénomène d'interférences.

b) L'onde 1 se propage dans le sens positif de l'axe :

$$p_1(x,t) = p\left(0, t - \frac{x}{c}\right)$$

$$P(0,t) = P_0 \cos(2\pi . f . t + \varphi)$$

$$\Rightarrow p_1(x,t) = P_0 \cos\left(2\pi f\left(t - \frac{x}{c}\right) + \varphi\right)$$

$$= P_0 \cos\left(2\pi f t - 2\pi \frac{x}{\lambda} + \varphi\right)$$

L'onde 2 se propage dans le sens négatif de l'axe :

$$p_2(x,t) = p\left(d, t + \frac{(x-d)}{c}\right)$$

avec $p(d,t) = P_0 \cos\left(2\pi f t + \varphi\right)$

$$\Rightarrow p_2(x,t) = P_0 \cos\left(2\pi f\left(t + \frac{x-d}{c}\right) + \varphi\right)$$

$$= P_0 \cos\left(2\pi f t - 2\pi \frac{d}{\lambda} + 2\pi \frac{x}{\lambda} + \varphi\right)$$

c) $p(x,t) = p_1(x,t) + p_2(x,t)$

$$= P_0 \cos\left(2\pi f t - 2\pi \frac{x}{\lambda} + \varphi\right) + P_0 \cos\left(2\pi f t - \frac{2\pi d}{\lambda} + \frac{2\pi x}{\lambda} + \varphi\right)$$

$$= P_0 \left[\cos\left(2\pi f t + \varphi - \frac{2\pi x}{\lambda}\right) + \cos\left(2\pi f t + \varphi - \frac{2\pi d}{\lambda} + \frac{2\pi x}{\lambda}\right)\right]$$

or $\cos p + \cos q = 2 \cos \frac{p+q}{2} \cos \frac{p-q}{2}$

$$= \frac{P_0}{2}\left(\cos\left(\frac{4\pi f t + 2\varphi - 2\pi d/\lambda}{2}\right) . \cos\left(\frac{4\pi x/\lambda - 2\pi d/\lambda}{2}\right)\right)$$

$$= \frac{P_0}{2}\cos\left(2\pi\frac{x}{\lambda} - \pi\frac{d}{\lambda}\right)\cos\left(2\pi f t + \varphi - \pi\frac{d}{\lambda}\right)$$

$\Rightarrow$ onde stationnaire (les variables x et t sont séparées).

d) On pose x_0 et x_0' 2 minima consécutifs (amplitude nulle)

$$P(x_0, t) = 0 \quad \forall t$$

$$\Leftrightarrow \frac{P_0}{2}\cos\left(\frac{2\pi x_0}{\lambda} - \frac{\pi d}{\lambda}\right)\cos\left(2\pi f t + \varphi - \frac{\pi d}{\lambda}\right) = 0 \ \forall t$$

$$\Leftrightarrow \frac{2\pi x_0}{\lambda} - \frac{\pi d}{\lambda} = \frac{\pi}{2} \quad \Leftrightarrow \frac{\pi}{2} + \frac{\pi d}{\lambda} = \frac{2\pi x_0}{\lambda}$$

Or x_0' est le minimum consécutif à x_0

$$P(x_0', t) = 0 \quad \forall t$$

$$\Leftrightarrow \frac{P_0}{2}\cos\left(\frac{2\pi x_0'}{\lambda} - \frac{\pi d}{\lambda}\right)\cos\left(2\pi f t + \varphi - \frac{\pi d}{\lambda}\right) = 0 \ \forall t$$

$$\Rightarrow \frac{2\pi x_0'}{\lambda} - \frac{\pi d}{\lambda} = \frac{3\pi}{2} \quad \Leftrightarrow \frac{\pi}{2} + \frac{\pi d}{\lambda} = \frac{2\pi x_0'}{\lambda} - \pi$$

donc $\frac{2\pi x_0}{\lambda} = \frac{2\pi x'_0}{\lambda} - \pi$

$\Leftrightarrow \quad x_0 = x'_0 - \frac{\lambda}{2}$

$\Leftrightarrow \quad x'_0 - x_0 = \frac{\lambda}{2}$

Donc 2 minima consécutifs sont séparés d'une distance $\frac{\lambda}{2}$.

On en déduit donc $\lambda = 2.e$

AN : $\lambda = 2.13{,}8 = 27{,}6$ cm.

Connaissant f, on en déduit $c = \lambda . f$

AN : $c = 1250 \times 27{,}6.10^{-2} = \underline{34{,}5 \text{ m.s}^{-1}}$.

Q2. a) L'amplitude de l'onde émise par un haut-parleur n'est pas constante, elle diminue lorsqu'on s'en éloigne (atténuation)

$\Rightarrow$ L'approximation " les amplitudes des surpressions p_1 et p_2 sont constantes le long de l'axe Ox "

n'est plus vérifiée lorsqu'on s'éloigne de la position médiane.

b) $\Delta\varphi_{2/1} = \varphi_2 - \varphi_1$

avec $\varphi_2 = -\dfrac{2\pi d}{\lambda} + 2\pi\dfrac{x}{\lambda} + \varphi$

et $\varphi_1 = -2\pi\dfrac{x}{\lambda} + \varphi$

$$\Rightarrow \Delta\varphi_{2/1} = -\frac{2\pi d}{\lambda} + \frac{2\pi x}{\lambda} + \varphi + \frac{2\pi x}{\lambda} - \varphi$$

$$\Delta\varphi_{2/1} = \frac{4\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi d}{\lambda}$$

$$\boxed{\Delta\varphi_{2/1} = \frac{2\pi}{\lambda}(2x - d)}$$

On peut aussi raisonner en terme de durée : pour parvenir en x, l'onde issue de HP1 met le temps $\dfrac{x}{c}$ et l'onde issue de HP2 met le temps $\dfrac{d-x}{c}$

$\Rightarrow$ Décalage temporel $\Delta t_{2/1} = t_2 - t_1$

$$\Delta t_{2/1} = \frac{d-x}{c} - \frac{x}{c}$$

$$\Delta t_{2/1} = \frac{d - 2x}{c}$$

Or $\Delta\varphi_{2/1} = -\omega \Delta t_{2/1} = -2\pi f \Delta t_{2/1}$

Soit $\Delta\varphi_{2/1} = \frac{2\pi f}{c}(2x - d)$

et $\lambda = \frac{c}{f} \Rightarrow \Delta\varphi_{2/1} = \frac{2\pi}{\lambda}(2x - d).$

c) Avec la formule des interférences à 2 ondes, on a :

$$A(x) = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos\Delta\varphi_{2/1}(x)}$$

d) Près de HP1 $A_1 \gg A_2$

donc $A(x) = \left(A_1^2\left(1 + \underbrace{\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 + \frac{2A_2}{A_1}\cos\Delta\varphi}_{\varepsilon}\right)\right)^{1/2}$

soit $A(x) = A_1(1 + \varepsilon)^{1/2}$

$$\simeq A_1\left(1 + \frac{\varepsilon}{2}\right)$$

$$A(x) \simeq A_1\left(1 + \frac{1}{2}\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 + \frac{A_2}{A_1}\cos\Delta\varphi\right)$$

que l'on peut simplifier au 1er ordre en $\frac{A_2}{A_1}$ par $A(x) \simeq A_1 \left(1 + \frac{A_2}{A_1} \cos \Delta\varphi\right)$

d) le vecteur de Fresnel du signal somme a presque la direction du vecteur de Fresnel associé à P_1 donc le signal somme a pratiquement la somme de la phase initiale de P_1 qui décroît avec x.

Exercice 7.

Q1. a) L'onde réfléchie parcourt 2 fois la distance D en plus par rapport à l'onde perçue directement, soit $\tau = \frac{2D}{c}$

b) Comme il n'y a pas de déphasage lors de la réflexion sur le mur, on a :

$$\Delta\varphi_{r/d} = -2\pi f . \tau = -\frac{4\pi f D}{c}$$

(déphasage de l'onde réfléchie par rapport à l'onde directe)
Ce déphasage est négatif car l'onde réfléchie est en retard sur l'onde directe.

c) Il peut y avoir atténuation de l'amplitude si les 2 ondes sont en opposition de phase au niveau de l'auditeur = interf. destructives. Cela se produit pour

$$|\Delta\varphi_{r/d}| = (2n+1)\pi \iff (2n+1)\pi = \frac{4\pi f D}{c}$$

$$\Rightarrow f = \frac{c}{4D}(2n+1)$$ avec n entier positif ou nul.

Le domaine audible s'étend de 20 à 20 000 Hz : $20 < f < 20\,000$

d'où $$20 < \frac{c}{4D}(2n+1) < 20\,000$$

soit $$\frac{20}{2n+1} < \frac{c}{4D} < \frac{20000}{2n+1}$$

$$\iff \frac{2n+1}{20\,000} < \frac{4D}{c} < \frac{2n+1}{20}$$

$$\frac{(2n+1)c}{80\,000} < D < \frac{(2n+1)c}{80}$$ $\Rightarrow$ condition d'interférences destructives.

Donc si $D < \frac{c}{80000}$ alors on ne peut jamais avoir d'interférences destructives

Soit $D < 4{,}3.10^{-3}$ m.

Ce n'est en pratique pas réalisable !

Q2. a) Lorsqu'il y a superposition de 2 ondes de même amplitude, l'onde résultante est d'amplitude $2A_0$

$$A_{dB} = 20 \log\left(\frac{2A_0}{A_{ref}}\right) = 20 \log\left(\frac{A_0}{A_{ref}}\right) + \underbrace{20 \log 2}_{= +6}$$

$A_{dB} = A_{0,dB} + 6$ dB.

Sur la courbe, on lit $A_{max,dB} = 97$ dB

$\Rightarrow A_{0,dB} = 91$ dB.

d) Les interférences destructives se produisent pour des fréquences telles que

$f = \frac{c}{4D}(2n+1)$ donc entre deux fréquences consécutives il y a l'écart

$$\Delta f = \frac{c}{4D}\left(2(n+1)+1\right) - \frac{c}{4D}(2n+1) = \frac{c}{4D}(2n+2+1-2n-1)$$

$$\Delta f = \frac{c}{2D} \iff D = \frac{c}{2\Delta f}$$

5,2 cm → 20000
4,8 cm → 9 Δf

$$9\,\Delta f = \frac{4{,}8 \times 20000}{5{,}2} = 18482 \text{ Hz}.$$

AN : $$D = \frac{342}{2 \cdot 18482/9} = \underline{8{,}3 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 8{,}3 \text{ cm}}$$

Exercice 8 :

Q1. a) $y_n(t) = y\left(0, t - \frac{x}{c}\right) = a\cos\left(\omega\left(t - x/c\right)\right)$

b) $y_n(t)$ peut s'écrire $y_n(t) = a\cos(\omega t - kx)$

avec k = pulsation spatiale qui vaut par identification $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi \cdot f}{c}$

AN : $$k = \frac{2\pi \times 100}{25 \cdot 10^{-2}} = \underline{2{,}5 \cdot 10^{3} \text{ rad.m}^{-1}}$$

Et $$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi c}{2\pi f} = \frac{c}{f}$$

AN : $$\lambda = \frac{25 \cdot 10^{-2}}{100} = \underline{2{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

Q2. L'onde incidente en B s'écrit

$y_{Bi}(t) = a\cos(\omega t)$ (nouvelle origine prise en B) l'onde réfléchie en B s'écrit :

$$y_{Br}(t) = a\cos(\omega t + \varphi)$$

B étant un point fixe, son élongation résultant des 2 ondes est nulle à tout instant :

$$\Rightarrow \quad y_{Bi}(t) + y_{Br}(t) = 0 \quad \forall t$$

Soit $y_B(t) = a\cos(\omega t) + a\cos(\omega t + \varphi) = 0 \ \forall t$

ce qui est vérifié pour $\varphi = \pi$.

$$\Rightarrow \boxed{y_{Br}(t) = a\cos(\omega t + \pi)}$$

Q3. Pour un point $M(x,t)$ l'onde incidente vaut :

$$y_{Mi}(t) = a\cos\left(\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right)$$

L'onde réfléchie se propageant vers les x décroissants, on a

$$y_{M,r}(t) = -a\cos\left(\omega\left(t + \frac{x}{c}\right)\right)$$

D'où $y_M(t) = a\cos\left(\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right) - a\cos\left(\omega\left(t + \frac{x}{c}\right)\right)$

or $\cos p - \cos q = -2\sin\frac{p+q}{2} \cdot \sin\frac{p-q}{2}$

$$y_M(t) = -2a\sin\left(\frac{\omega(t - x/c) + \omega(t + x/c)}{2}\right) \times \sin\left(\frac{\omega(t - x/c) - \omega(t + x/c)}{2}\right)$$

$$\boxed{y_n(t) = -2a \sin(\omega t) \cdot \sin\left(\frac{\omega x}{c}\right)}$$

$\Rightarrow$ expression d'une onde stationnaire
(produit d'une fonction sinusoïdale du temps par une fonction sinusoïdale de la position)
d'amplitude $\left|-2a \sin\left(\frac{\omega x}{c}\right)\right|$

c) les noeuds sont des points où l'amplitude est nulle $\forall t$ soit

$$0 = \left|-2a \sin\left(\frac{\omega x_{noeud}}{c}\right)\right| \Leftrightarrow \frac{\omega x_{noeud}}{c} = n\pi$$

$$x_{noeud} = \frac{c}{\omega} \cdot n\pi$$

$$\text{or } \frac{2\pi}{\omega} = f \Rightarrow x_{noeud} = n \cdot \frac{c}{2f} = n \cdot \frac{d}{2}$$

AN : $\underline{x_{noeud} = n \cdot 1{,}25 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$

En termes de déphasage : en un point d'abscisse x_{noeud}, on a $\varphi_i = \frac{-\omega \cdot x_{noeud}}{c}$

et $\varphi_r = \frac{\omega x_{noeud}}{c} + \pi$

(car $y_{n,r}(t) = -a\cos\left(\omega\left(t + \frac{x}{c}\right)\right) = a\cos\left(\omega t + \frac{\omega x}{c} + \pi\right)$)

D'où $\varphi_{r/i}(t) = \frac{\omega x_{noeud}}{c} + \pi + \frac{\omega x_{noeud}}{c}$

$$= \frac{2\omega}{c} x_{noeud} + \pi$$

avec $x_{noeud} = \frac{c}{\omega} . n\pi$ on a $\varphi_{r/i}(t) = \frac{2\omega}{c} . \frac{c}{\omega} . n\pi + \pi$

$\Leftrightarrow \varphi_{r/i}(t) = 2n\pi + \pi = \underline{(2n+1)\pi}$.